

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公 募 区 分 : 環境問題対応型研究 (一般課題)

研究予定期間 : 令和3 (2021) 年度 ~ 令和5 (2023) 年度

課 題 番 号 : 【2-2105】

体系的番号 : (J P M E E R F 2 0 2 1 2 0 0 5)

研 究 課 題 : 「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」

Research Title : Development of National and Local Governments' Carbon Management System for Building Sector

研 究 代 表 者 : 下田 吉之

研究代表機関 : 大阪大学

研 究 領 域 : 気候変動領域

キ ー ワ ー ド : カーボンマネジメント、民生部門、ボトムアップシミュレーション、統計データ、スマートメータデータ

令和6 (2024) 年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	1
I. 成果の概要.....	3
1. はじめに（研究背景等）.....	5
2. 研究開発目的.....	5
3. 研究目標.....	5
4. 研究開発内容.....	6
5. 研究成果.....	6
5-1. 成果の概要.....	6
5-2. 研究目標の達成状況.....	19
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	20
6. 研究成果の発表状況の概要.....	23
6-1. 成果の件数.....	23
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	23
7. 国際共同研究等の状況.....	24
8. 研究者略歴.....	24
II. 成果の詳細.....	25
II-1 サブテーマ1「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」	25
[サブテーマ1 要旨]	25
1. サブテーマ1 研究開発目的.....	25
2. サブテーマ1 研究目標.....	26
3. サブテーマ1 研究開発内容.....	26
4. サブテーマ1 結果及び考察.....	27
5. サブテーマ1 研究目標の達成状況.....	38
III. 研究成果の発表状況の詳細.....	40
(1) 成果の件数.....	40
(2) 誌上発表.....	40
(3) 口頭発表.....	41
(4) 知的財産権.....	42
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	42
(6) マスメディア等への公表・報道等.....	43
(7) 研究成果による受賞.....	43
(8) その他の成果発表.....	43
Abstract.....	44

別紙 公募審査・中間評価結果への対応

I. 成果の概要

<課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度 ～ 令和5（2024）年度
課題番号：	【2-2105】
研究課題：	「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（国立大学法人大阪大学工学研究科、教授）
重点課題（主）：	【重点課題⑦】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発
重点課題（副）：	【重点課題⑨】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	非該当
研究領域：	気候変動領域

<キーワード>

カーボンマネジメント
民生部門
ボトムアップシミュレーション
統計データ
スマートメータデータ

<研究体制>

サブテーマ1「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」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立大学法人	工学研究科	教授	下田 吉之	2021年4月1日～ 2024年3月31日
国立大学法人	工学研究科	准教授	山口 容平	2021年4月1日～ 2024年3月31日
国立大学法人	工学研究科	助教	内田 英明	2021年4月1日～ 2024年3月31日

＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	17,353千円	5,206千円	22,559千円
2022	17,134千円	5,140千円	22,274千円
2023	16,681千円	5,004千円	21,685千円
合計	51,168千円	15,350千円	66,518千円

1. はじめに（研究背景等）

現在わが国では地球温暖化対策計画に基づき、2030年度に2013年度比46%の温室効果ガス排出削減を目標として政策が実施されている。計画の遂行のため地球温暖化対策推進本部や関連する審議会等において毎年進捗状況が点検されているが、資料として示されるのは全体の温室効果ガス排出量、部門別のエネルギー起源年間CO₂排出量、計画に記載されている技術の普及状況等にとどまり、詳細な要因分析は行えていない。そのため進捗状況が2030年目標に向かって順調に進行しているかどうかは明らかでない。

同計画では民生部門について、目安として家庭部門で66%、業務その他部門で51%という高い目標を掲げているが、両部門は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こと、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削減量が評価できないことなど、計画の進行管理が特に困難な部門である。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、エネルギー市場の自由化により域内の部門別エネルギー消費量の把握が困難になっており計画に掲げた削減目標達成に向けた進行管理は更に難しくなっている。

本研究グループはこれまで民生部門最終エネルギー需要ボトムアップシミュレーションモデルを開発し、2030年や2050年の民生部門エネルギー需要・電力ロードカーブを予測するとともに、学術分野としての「エネルギー需要科学」を確立すべく活動をおこなってきた。本研究はこれらの成果に基づき、民生部門の温室効果ガス排出削減を確実に進めるためのマネジメントシステムの開発を目的とする。

2. 研究開発目的

本研究では、地球温暖化対策計画や地方公共団体実行計画（区域施策編）に基づく毎年の民生部門からのCO₂排出削減量を、従来のエネルギー統計に加えて①研究チームで開発した、居住者行動や気象データ、建築の性能等に基づき機器毎の稼働を模擬し、気象の差異や地域内の建築・世帯のエネルギー消費特性の分布を再現できるボトムアップ型エネルギー最終需要シミュレーション、②環境省の家庭CO₂統計等アンケート調査、③大量のスマートメータデータの3つのツールから構築したサイバーフィジカルシステムを用いて分析し、対策の進捗状況を詳細に把握し、国や自治体の計画の確実な達成に寄与することを目指し、以下の課題を解決していく。

- ・ 年々の気象変化影響は、温暖化対策計画が想定する1年当たり削減量の数倍あり、シミュレーションで気象影響を除去する手法を開発する。
- ・ 高効率機器・省エネ建築の導入効果について、従来の全国レベルの普及量では地域や世帯特性等の特性が反映できず、アンケートで地域別、世帯・建物類型別の導入量を明らかにし、これらの差異を考慮した効果を算出する。また、スマートメータデータのロードカーブを経年で比較し、シミュレーションを援用して太陽電池普及状況や特定機器の電力消費変化を同定する手法を開発する。
- ・ エネルギー市場の自由化により、電力会社の選択がCO₂排出量に影響を与えるが、比較的消費の大きな世帯が新電力に切り替える傾向がある。アンケート情報から世帯特性別の電力会社の選択状況を調査し、CO₂排出の増減に与える影響を評価する。

上記目的のため、スマートメータデータからシミュレーション等を援用し機器エネルギー消費を推計する手法など3つのツールを相互に活用する分析手法を確立する。

同時に、国および地方自治体の民生部門カーボンマネジメント状況を調査し、望ましいマネジメントのあり方を提言するとともに、必要なアンケートやデータ収集の要件を示す。

3. 研究目標

全体目標	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CO ₂ 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。
--	---

サブテーマ 1	「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」
サブテーマ 1 実施機関	国立大学法人大阪大学
サブテーマ 1 目標	全体目標と同様

4. 研究開発内容

はじめに、シミュレーションモデルの精度向上のため、スマートメータデータを活用した逆問題解析を行った。TREESモデルは社会生活基本調査の生活時間データを基に居住者行動を模擬するボトムアップ型モデルであるが、このデータは調査期間が限定的であり、日々の生活行動の実態を十分に反映できていない可能性がある。そこで本研究では、スマートメータデータが居住者行動に基づくエネルギー消費の実態を反映していることを前提に、中間期の居住者行動モデルを逆問題最適化した。更にその結果を基に冷房期の冷房利用行動も最適化し十分な精度を得た。これにより、スマートメータデータからモデルパラメータを校正し、詳細な住民行動の傾向を推定する手法を確立した。

次に、家庭部門におけるシミュレーションモデルの精度向上と政策評価のための機能向上について概要を述べる。TREESモデルでは世帯単位のエネルギー消費量は、各都道府県の代表世帯の属性情報を基に推計される。前述した社会生活基本調査に基づく居住者行動モデルだけでなく、気象データ、住宅の間取り、外壁の仕様などのデータを入力条件として、エネルギー消費を忠実に再現している。本研究では現時点で公表されている最新の統計データによる精度検証に加え、高効率照明や高効率給湯器の導入、トップランナー制度による機器の省エネ性能向上、新築住宅の省エネ基準適合の推進の4項目の対策効果を推計した。これにより、家庭部門における対策の進捗状況と、対策ごとの効果を定量的に評価することができた。

業務部門においても、業務部門最終エネルギー需要予測モデルに対して精度向上と政策評価のための機能向上を行った。このモデルでは、約3万の代表モデルを用いて、業務施設のエネルギー需要を推計している。ストック更新のモデル化により、断熱性や省エネルギー技術の評価を行い、長期的な設備採用のトレンドを反映した。家庭部門と同じく国の統計情報とモデルの推計結果を比較することで、モデルの精度を評価し、各対策の効果を定量化した。

最後に、エネルギー市場の自由化により、電力会社の選択が各家庭のCO2排出量に影響を与える状況を踏まえ、大規模なwebアンケート調査を実施した。この調査では、複数の自治体の住民に対して世帯特性別の機器保有状況や電力会社の選択状況を調査し、地域ごとのエネルギー需要と脱炭素対策の進捗を評価するために必要となるデータのあり方を示した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

(1) スマートメータデータを利用した逆問題解析

世帯類型別、時刻別に平均値と標準偏差として集約された高精細なスマートメータデータを利用し、行動パラメータの校正を目的として中間期の逆問題解析を実施した。その結果全時刻においてTREESモデルの電力消費量の推計値が向上し、特に深夜帯で顕著であった。この結果に最も寄与したのは睡眠時間の短縮であった。社会生活基本調査と比較し、より信頼性の高いと思われる実測データと比較したところ、いずれの世帯累計においても誤差は減少したが、2人戸建世帯と3-4人集合世帯では依然として乖

離が大きく、局所解に陥っている可能性が示唆された。同様に冷房期を対象とした最適化では、全時間帯で大きく誤差が改善され、電力消費量がよく一致した。特に居間における冷房ON確率が最適化後により実態に近い値を示した。以上は文献[4]として現在投稿中である。

また、コロナ禍による行動変容の分析では、スマートメータデータの経年変化から2022年度の電力消費量が2017年度よりも大幅に増加し、主要因はテレワーク生起確率の上昇であったことが示された。しかし、最適化されたテレワーク生起確率は現実の調査結果と比較して過大であり、稼働機器の設定条件の改善が必要である。

(2) 家庭部門モデルの精度向上

TREESモデルによる全国の家庭部門エネルギー消費量と総合エネルギー統計の絶対値には差があるため、2013年度を基準とした増減に注目し、モデルによる推計結果をエネ庁および環境省の増減要因分析と比較した。本研究で推計された各年の削減量の収支はエネ庁に対して誤差率17%未満、環境省との比較で誤差率15%未満であり、毎年の増減量はモデルで考慮した気象影響と対策効果で概ね説明できる。本推計では国勢調査結果から毎年の世帯数変化を推計し、世帯変化要因を算出した結果、エネ庁・環境省の増減要因分析とも概ね整合している。機器毎の削減効果としては、住宅の高性能化と高効率エアコンの導入効果が最大であり、次いで高効率給湯器の導入と冷蔵庫の性能向上が削減に大きく寄与している。

次に、2030年度に向けた対策進捗評価を行った。2013年度から2021年度までの削減実績を直線で近似すると、2021年度時点での二次エネルギー消費削減量は目標値に対して約88%の達成率となる。現状では2030年度目標の達成にはさらなる対策の強化・推進が必要であることがわかった。さらに、政府削減対策実施ケースの評価と限界削減費用の計算を行い、地球温暖化対策計画に基づく家庭部門の省エネルギー対策が完全に実施された場合の2050年度までの二次エネルギー消費量を推計した。現行の対策では2030年度の政府削減目標に僅かに届かず、2050年度の家庭部門ゼロエネルギー達成も困難であることが示唆された。特に、給湯用途と暖房用途で電化を促進することによる削減の余地が大きい。追加対策の効果を評価するために、各対策のコストとCO2削減量の関係を示し、低コストで高い効果を得るためには世帯類型別に対策をとることが有効であることがわかった。以上については、2020年度までの統計データに基づく分析を文献[1][3]として報告済みである。

最後に、追加対策の提案とその効果の予測を行った。現状の対策では2030年削減目標の達成が困難であるため、4つの追加対策シナリオを提案し、2050年度までの省エネルギー効果を推計した。特に住宅設備の電化と太陽電池の設置台数増加を想定したシナリオが効果的であった。また、すべての追加対策を実施する混合シナリオでは、2030年度時点で2013年度比50%以上の削減、2050年度において家庭部門のゼロエネルギー化を達成できることが示された。

(3) 業務部門モデルの精度向上

業務部門モデルの開発にあたっては、経年変化の推計結果と精度評価を行った。施設用途区分に基づくモデルによるエネルギー消費量と総合エネルギー統計の比較から、電力消費は良い一致を示す一方で、燃料消費は過小推計された。これはコジェネレーション設備や医療施設の消毒設備などのエネルギー消費を考慮していないためであるが、政府が想定する業務施設のエネルギー効率向上対策に関してはモデルが精度良く再現していることが確認された。2013年度から2021年度までのエネルギー消費量の変化を分析した結果、コロナ禍やエネルギー価格の高騰を除けば、モデルの結果は総合エネルギー消費統計と概ね一致しており、エネルギー効率向上による削減効果も正確に再現されていることが確認された。

次に、2013年度からのエネルギー消費量変化の推計に基づく地球温暖化対策計画の進捗評価を行った。2030年度の推計では、モデルによる削減量は政府推計よりも約60PJ/年小さく、延床面積の増加によるエネルギー消費の増加を考慮すると、削減量は約150PJ/年不足することが明らかとなった。特に差異が大きいのは建築物の省エネルギー化、高効率給湯機の導入、機器のエネルギー消費向上であり、建築物の省エネルギー化についてはさらにエネルギー性能の向上が必要であることが示された。また、照明の稼働時間や普及速度に関して政府推計には誤差が生じている可能性があることも指摘された。

最後に、2030年度に向けた削減可能性評価と追加対策の検討が行われた。推計されたエネルギー消費の変化によるCO2排出量の変化から、2030年度のCO2排出量は133MtCO₂/年となり、目標に対して17MtCO₂/年不足すると推計された。追加対策として、全空調熱源機器をトップランナー水準のものに置き換える対策や空調・給湯熱源の電化、断熱強化などが提案され、これら全手法で13MtCO₂/年の削減ポテンシャルがあることがわかった。特に熱源効率向上や熱源電化が有効な追加対策であると考えられる。以上は文献[5]として現在投稿中である。

(4) アンケートデータによる分析

アンケート調査より新電力シェアは33.5%、うち大阪ガスが18.4%を占め、これは概ね既存の統計調査と整合的であった。ただし淡路島では大阪ガスの供給区域外のためシェアが大きく異なること、世帯年収が高いほど新電力への契約切り替えが多く、電力消費量と相関があることが示唆された。また同じ近畿圏の近接した地域であっても保有設備の割合には大きな差があることから、地域特性を反映したエネルギー需要予測において、特定自治体に対する詳細なデータ取得が重要であることが示された。

(5) 地域のエネルギー・カーボンマネジメントへの応用

本研究の主題である地域のエネルギー・カーボンマネジメントにおいては、精度の高い統計が不足しているため、スマートメータデータやアンケートデータを用いたシミュレーションが有効である。アンケート、スマートメータデータを効果的に活用し、十分な精度を有するシミュレーションモデルを組み合わせたデジタルツインモデルは、自治体の特性に応じた温室効果ガス排出削減対策のための有効なツールとなることが示されたと言える。

(1) スマートメータデータを利用した逆問題解析

(1-1) 中間期の最適化結果

最適化によるロードカーブの変化を図5に示す。ここで、各色面はTREESによる対応する用途の電力消費量の推計値で、破線は最適化前のTREESによる電力ロードカーブの推計値、実線はスマートメータによる実測値で、いずれも2人世帯・集合・中間期の平均値である。図5より全時刻でTREESによる電力消費量の推計値が大きくなり、推計精度が高まったことがわかる。特に20時から6時までの深夜の時間帯において顕著である。その一方、8時から12時までの午前中の時間帯において若干の過大推計となった。

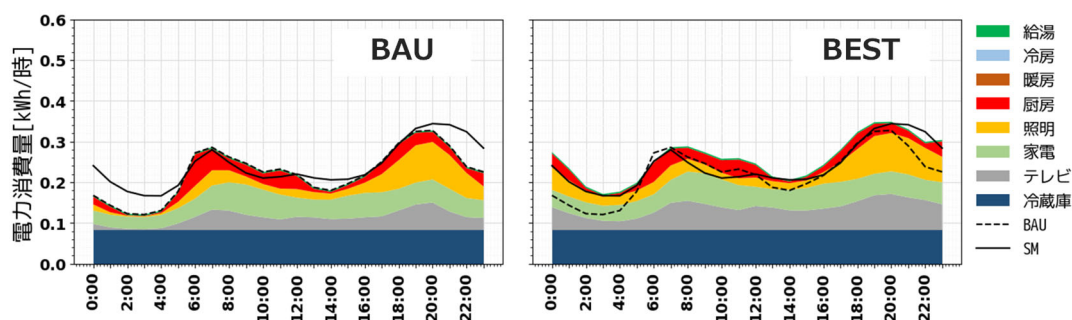


図5-最適化によるロードカーブの変化

(1-2) 最適化結果の妥当性検証

較正されたパラメータの妥当性について考察する。最適化対象のうち統計や実測データ等が存在する睡眠時間に係るパラメータの妥当性を検討した。睡眠時間について2人集合世帯と2人戸建世帯、3-4人集合世帯、3-4人戸建世帯の各世帯類型における睡眠時間の中央値を表5に示す。2人集合世帯と3-4人戸建世帯では大きく減少しているのに対し、2人戸建世帯と3-4人集合世帯では若干の減少にとどまっている。

睡眠時間を調査する生活行為生成パラメータの生成に用いた社会生活基本調査以外の信頼できる調査として、株式会社C2による熟睡アラーム睡眠統計がある。これは同社が配布するアプリより得られたユーザ9282人のデータをもとに作成されたもので、アンケート調査とは異なりスマートフォンのアプリを活用した実測に基づいたものである。第1回熟睡アラーム睡眠統計による性別及び年代ごとの平均睡眠時間を表6に示す。表6より、全体の平均睡眠時間は352分であり、国民健康・栄養調査の360分から420分よりも短い。これはアンケート調査と実測のデータ収集方法の違いによるものであると考えられる。表5に示した各世帯類型における睡眠時間の中央値と比較すると、2人集合世帯と3-4人戸建世帯では大幅に近づき、較正結果は妥当であると考えられる。その一方で、2人戸建世帯と3-4人集合世帯では乖離が大きい。これは最適化が局所解に陥ってしまったことを示しており、今後妥当な制約条件を設定することで回避できるものと考えられる。

表 5-各世帯類型における睡眠時間の中央値

対象	中央値
BAU	460 分
2 人集合	355 分
2 人戸建	430 分
3-4 人集合	450 分
3-4 人戸建	365 分

表 6-第 1 回熟睡アラーム睡眠統計による性別及び年代ごとの平均睡眠時間

区分	男性	女性
70代以上	391分	372分
40代	343分	352分
20代	341分	357分
全体	352分	

(1-3) 冷房期の最適化結果

2人世帯における冷房期の最適化結果を表7、21-11時における冷房 ON 確率の変化を図6に示す。また最適化前後のロードカーブを図7に示す。全ての時間帯において大きく誤差が改善されており、電力消費量がよく一致している。6時頃や12時頃に過大推計となっているが、これは中間期においても同時時間帯で過大推計となっていたため、冷房期最適化後にもその影響が出たものと考えられ、冷房期と中間期の主な差分である冷房や冷蔵庫の電力消費量の推計としては若干過小推計であるとみなせる。

図6に示すように居間において冷房 ON 確率が50%になる室温が最適化後32℃と高い値を示している。最適化後の居間における冷房開始室温別 ON 回数の頻度分布を図8に示す。冷房 ON 時の室温は32℃以下がほとんどである。これは冷房 OFF 時に5分おきに稼働判定を行い、その度に冷房 ON 確率が評価されるため確率が低くても ON となりやすいためである。就寝時冷房使用では、「使用しない」が75%と大きい。これはエアコンの電力消費量が比較的小さい自動運転機能や除湿機能などを考慮できていないことが要因として考えられる。本最適化はエアコンの冷房機能のみを使用する前提であり、誤差の要因となっている。また、「切タイマー使用」が2%と小さい。これは中間期最適化後の過小推計分を冷房の電力消費量によって調整したため、実際に切タイマーが使用されていても「常時使用」に割り当てられたと考えられ、「切タイマー使用」の実際の確率は最適化結果よりも高い可能性がある。これは中間期の最適化における誤差をさらに小さくすることで改善されることが考えられる。

表7-冷房期最適化による各パラメータの変化

		BAU	最適化結果
就寝時 冷房使用	使用しない	14%	75%
	切タイマー 使用	57%	2%
	ずっと使用	29%	23%

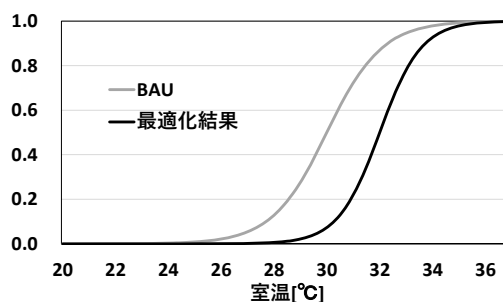


図6-居間（21-11時）の冷房ON確率の変化

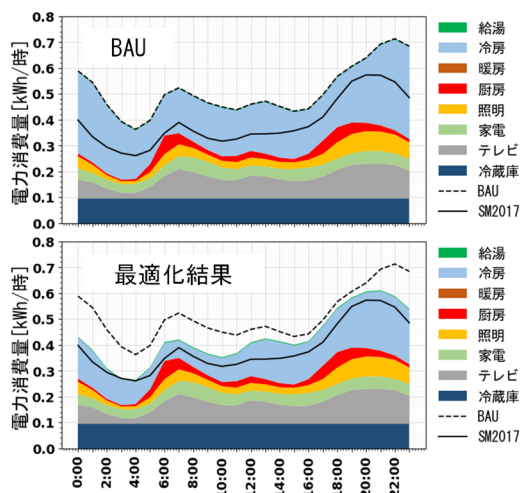


図7-冷房期最適化前後のロードカーブ

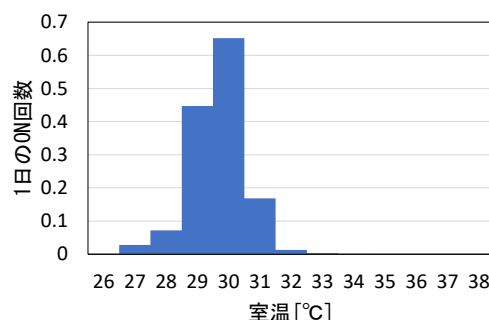
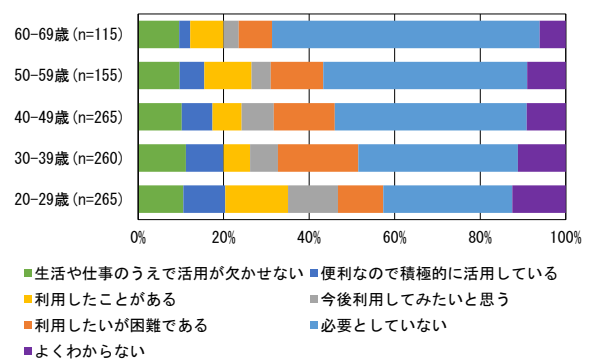
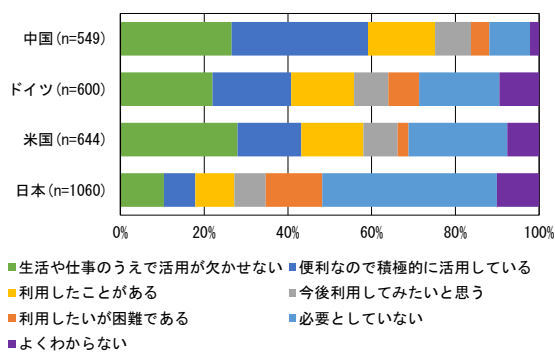
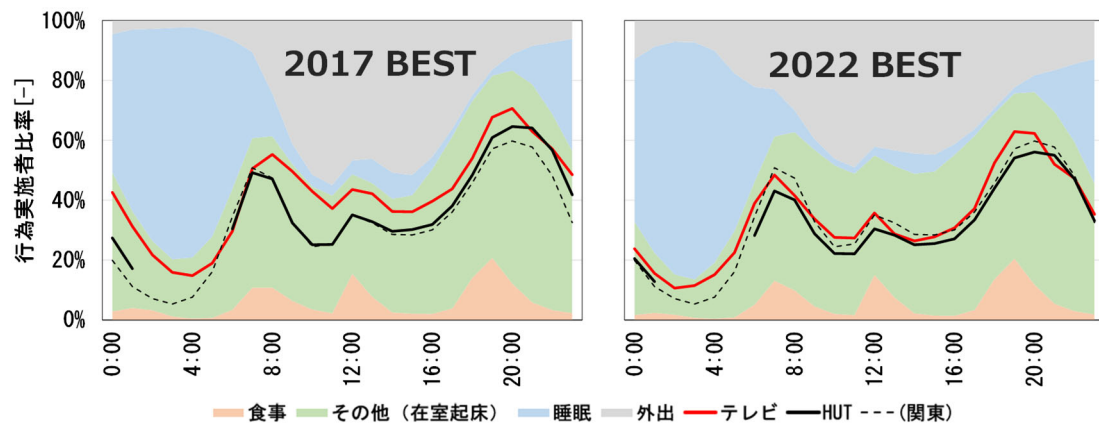
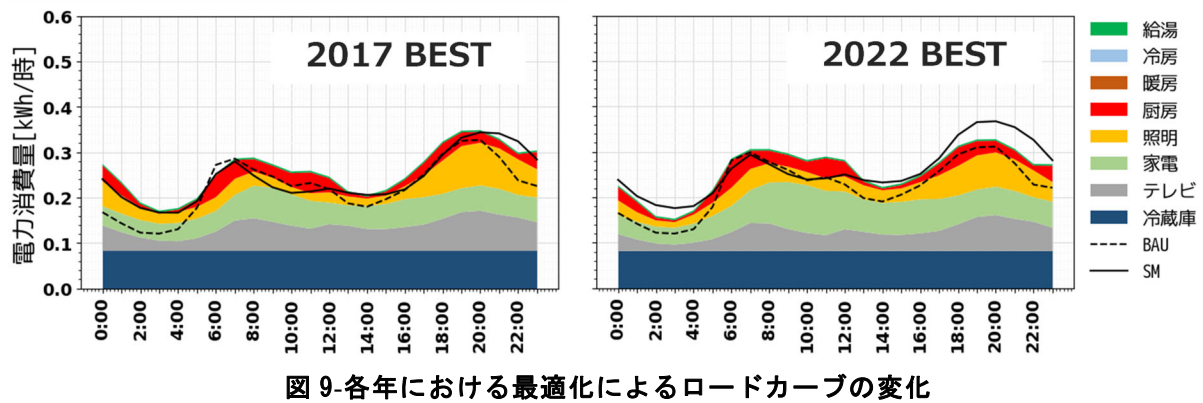


図8-冷房開始室温別 ON 回数の頻度分布（居間）

(1-4) コロナ禍による行動変容の分析

本研究では、パラメータを較正する枠組みを応用し、スマートメータデータの経年変化からエネルギー消費の発生構造の変化を検知する試みの一例としてコロナ禍による行動変容を取り上げる。TREESモデルの推計には、対応する年度の気象条件を用いている。2022年度における最適化の対象期間は、2017年度と同様に中間期とし、2022年度5月6日から6月21日と9月27日から10月21日までの平日とした。図9に結果を示す。各色面はTREESモデルによる対応する項目の電力消費量の推計値で、破線は最適化前のTREESモデルによる電力消費の総量の推計値、実線は各年のスマートメータによる実測値で、いずれも2人集合世帯で中間期の平均値である。この最適化後の行動の2017年度と2022年度の結果の差が、コロナ禍による行動変容と考えることができる。

各年における最適化による居住者行動の変化を図10に示す。ここで、各色面はTREESモデルにおける対応する項目の行為実施者比率で、赤実線は最適化されたテレビ稼働率、黒実線は各年のテレビ調査白書による関西地区の時間帯別総世帯視聴率（Households Using Television, HUT）の平日平均、黒破線は2019年7月1日から9月29日までの関東地区の総世帯視聴率の平日平均である。2022年度の方が2017年度よりも8時から18時までの昼の時間帯において仕事や学校を含む外出行為を実施する世帯構成員の比率が低下しており、テレワーク生起確率が大幅に上昇したことを示している。図9に示したように、日中の電力消費量の推計値は2017年度よりも2022年度の方が各時刻で約1.2倍程度大きく、昼間において外出行為を実施する世帯構成員の比率が低下するように最適化されている。テレワーク生起確率は2017年度ではほとんど変化しなかったのに対して、2022年度では約70%となった。



較正されたパラメータの妥当性について考察する。最適化対象のうち、2017年度と2022年度で大きく変化したテレワークに係るパラメータの妥当性を検討した。テレワークの利用状況を調査する国の研究として、総務省による「国内外における最新の情報通信技術の研究開発及びデジタル活用の動向に関する調査研究」がある。図11より2022年における日本のテレワーク率は約30%である。図12より20代のテレワーク率は40%近い一方、60代のテレワーク率は20%と年代による違いがあるが、本研究で最適化された2022年度におけるテレワーク生起確率は70%と過大である。これはTREESモデルにおけるテレワーク行為に対応した稼働機器をパソコンのみと電力消費の増分を小さく設定したことによる。例えば、テレワークに使用されるパソコンがノート型ではなく、デスクトップ型であると仮定すると、パソコンの電力消費量は約60 [Wh/hour] から約120 [Wh/hour] に2倍増加する。約7割のモデル世帯がノート型を保有していると考えられることから、2022年度におけるテレワーク生起確率は5割程度になると推測される。その他テレワーク行為に対する稼働機器に電気ジャーポットなどを追加するなど、設定条件の改善により

正確な較正が見込まれる。

(2) 家庭部門モデルの精度向上

(2-1) 温室効果ガス削減対策の効果と気象影響の定量化

後述するようにTREESモデルによる全国の家
庭部門エネルギー消費量と総合エネルギー統
計の絶対値には差があるため、ここでは2013年
度の値を基準とした増減に着目して、モデルに
よる推計結果を資源エネルギー庁（以下エネ
庁）及び環境省の増減要因分析（エネ庁：『令
和2年度におけるエネルギー需給実績（確報）』、
環境省：『排出量増減要因分析（2019年確報
値）』）と比較した。図13にエネ庁推計値との
二次エネルギー消費量での比較および環境省・
国立環境研究所温室効果ガスインベントリオ
フィス（以下インベントリオフィス）発表によるCO₂排出量との比較を示す。

本研究で推計された各年の削減量の収支は
エネ庁に対して誤差率17%未満（統計値に不
自然な変動が見られる2017年度を除く）、環
境省との比較で誤差率15%未満（2014年度・
2017年度を除く）となっていることから、毎
年の増減量はモデルで考慮した気象影響と対
策効果で概ね説明できる。本推計の2014年
度値は環境省と整合しないが、インベントリ
オフィスとは整合しており問題ないとする。ま
た、本推計では4.の2-4)の手法により国勢
調査結果から毎年の世帯数変化を推計し、世
帯変化要因を算出した。エネ庁・環境省にお
いても各年度の世帯数要因と世帯人員要因の
合計値は排出量増加の方向になっており、本
推計の結果は概ね整合している。

図14に2013年度比の二次エネルギー消費削減量推計結果を示す。前述した2017年度と同様、2020年度にも統計値との乖離があるが、これは(1-4)に示した新型コロナウイルスの流行に伴う住宅滞在時間の増加が現段階でTREESモデルに反映されていないことが原因と考えられる。また、気象影響によりエネルギー消費は毎年著しく変動しており、影響の大きい2015年度ではみかけの削減量のおよそ77%が気象条件に起因する。気象条件は暖房需要に最も大きな影響を与え、次いで冷房、給湯のエネルギー消費に影響を与える。

本研究では前述した4項目の対策の効果を推計したが、図14より、機器毎では冷暖房、すなわち住宅の高性能化と高効率エアコンの導入効果が最大で、次いで高効率給湯器の導入と冷蔵庫の性能向上が削減に大きく寄与している。

(2-2) 2030年度に向けた対策進捗評価

図15に2021年度までの家庭部門の取組による省エネルギー効果の推計値と2030年度における政府の削減目標値を示す。「高効率給湯器の導入」、「高効率照明の導入」、「トップランナー制度等による機器の省エネ性能向上（図ではトップランナー制度と表記）」、「新築住宅における省エネ基準適合の推進（図では新築住宅の断熱性能向上と表記）」はシミュレーションによる推計結果で、それ以外の6つの項目については本モデルでは推計が困難であるため、地球温暖化対策計画の進捗状況に記載されてい

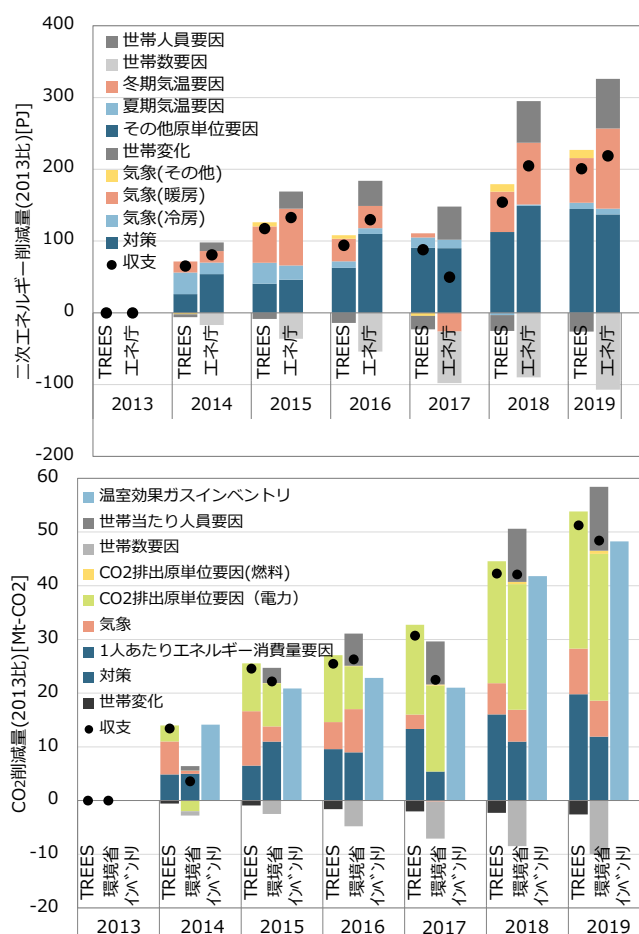


図13-政府の増減要因分析との比較
(上：資源エネルギー庁、下：環境省)

る削減量をそのまま引用した。シミュレーションで推計した4項目は省エネルギー効果全体の90%以上を占めており、それ以外の対策効果は僅かである。また、目標達成の目安として2013年度から2021年度までの削減実績を直線で近似（図中の点線）すると、2021年度時点での二次エネルギー消費削減量は目標値に対して約88%の達成率となる。直線と実績を比較すると、目標に対する達成率は年々増加傾向にあるものの、現状では2030年度目標に達していない。以上から、2030年度目標の達成のためには、対策のさらなる強化・推進を図る必要があることがわかる。

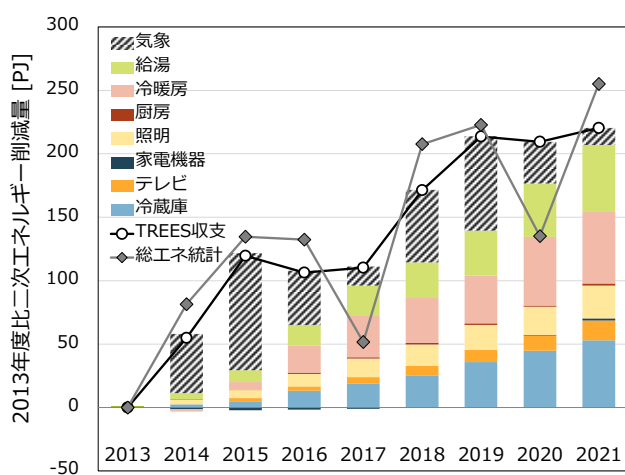


図14-2013年度比二次エネルギー削減量

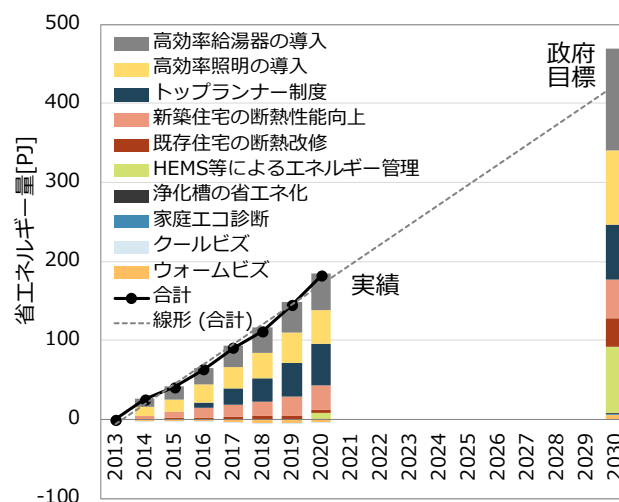


図15-家庭部門の対策進捗と2030年度目標（右端）

（2-3）政府削減対策実施ケースの評価と限界削減費用の計算

地球温暖化対策計画における家庭部門の省エネルギー対策が完全実施された場合を想定し、TREESモデルを用いて2050年度までの二次エネルギー消費量を推計する。対策の導入方法としては上述した（2-1）、（2-2）の2021年度までの進捗状況に基づき、2021年より対策導入ペースを加速させる。また、2030年度から2050年度まではその導入ペースが維持されるとする。なお、気象データはすべて2021年度のものをを用いる。地球温暖化対策計画に基づいて設定した2030年対策ケースにおける用途別のシミュレーション条件の概要を表8に示す。上記の計算条件による2050年度までの年間二次エネルギー消費量推計結果を図16に示す。政府の削減対策のうち、TREESモデルでは考慮できていないHEMSや浄化槽の省エネ化による削減量を除くと、政府試算の二次エネルギー消費量削減目標は2013年度比で34%減少となっているので、「2013年度比34%減少」を2030年削減目標として定義する。なお、家庭部門における政府の2030年目標は、PV等の発電量を含まず最終エネルギー消費量のみを対象にしている点は注意が必要である。図より2030年対策実施ケースでも政府の2030年削減目標には僅かに届かないことがわかる。また、2050年度におけるTREESモデル推計結果の収支（図中のTREES合計）を見ると、2050年度の家庭部門ゼロエネルギーの達成も困難であることがわかる。これは、灯油用途とガス用途のエネルギー消費量が残存するなど、家庭部門の省エネルギー化が十分に進まないためである。特に、給湯用途と暖房用途で電化を促進することによる削減の余地が大きい。また、冷蔵庫やテレビ、照明用途、厨房用途に関しては、2025年度時点で既に省エネルギー化の進行速度が停滞しており、今後の削減余地は限定的であると考えられる。

なお、これらの追加対策を考える上で、各対策のコストを示すことは重要であるが、TREES

表8-2030年対策実施ケースの設定

対策名	設定内容
住宅の省エネ化（新築・改修）	新築住宅のZEH基準適合率を増加させ、2030年以降は100%（適合義務化） また、ZEH基準適合住宅にはPVを導入する。
高効率給湯器の導入	HP給湯機を1590万台、潜熱回収型給湯器を3050万台、燃料電池を300万台導入。その他は従来型給湯器とする。また、2030年以降はHP給湯器と燃料電池が増加すると想定。
高効率照明の導入	2030年時点におけるLED照明の普及率が100%
家電機器の性能向上	テレビと冷蔵庫は2021年の最高性能機器が2026年以降の平均となるように設定。エアコンは政府目標に基づいて将来APFを設定。

モデルでは世帯特性や地域といった類型毎に対策効果を計算できるため、限界削減費用を類型毎に算出することができる。図17に対策のコストを（対策技術導入費用－既存技術導入費用）とした場合の限界削減費用とCO2削減量の関係を示す。照明、給湯、住宅断熱の各対策において効果が世帯人員により大きく変化し、低いコストで高い効果を得るためには世帯類型別に対策をとることが有効であることがわかる。

（2-4）追加対策の提案とその効果の予測

（2-3）の結果を踏まえ、2030年・2050年削減目標の達成に向けた追加的対策を提案し、その削減効果を評価する。（2-3）では、現状の対策では2030年削減目標を達成することや、2050年に家庭部門でゼロエネルギー化を達成することが困難なことが示唆された。そこで、（2-3）の2030年対策ケースを基準として4つの追加対策シナリオを提案し、2050年度までの省エネルギー効果を推計することで、目標の達成にどのような追加対策が効果的かを明らかにする。各シナリオの概要を表9に示す。

なお、一般的なヒートポンプ給湯機（以下、HP給湯機とする）の稼働は深夜時間帯に貯湯する深夜運転モードであるが、近年は昼間運転モードが推奨されている。HP給湯機は外気温が高いほどCOPが高くなることに加え、家庭内で太陽電池による発電量を自家消費することが推奨されていることから、ここでは昼間運転モードで稼働した場合を計算する。

TREESモデルにより推計したシナリオ別の2050年度までの年間二次エネルギー消費量を図18に示す。シナリオ(A)、(B)では表9で示したそれぞれのシナリオにおける削減対策を実施した結果、シナリオ(C)では電化促進に加え各戸の太陽光発電を1kW増加させた結果を示している。混合シナリオでは、(A)から(C)の削減対策をすべて実施した結果を示している。また、図中の赤線は2030年削減目標の2013年度比約34%削減の目標ラインを示しており、青線は50%削減の目標ラインを示している。

表9-2050年までの追加的対策の概要

シナリオ名	対策名		対策内容
(A) 省エネルギー行動促進シナリオ	Step 1	省エネルギー行動実施	・冷暖房設定温度の変更 (クールビズ、ウォームビズ)
			・家電機器の使用制限
(B) 技術革新シナリオ	Step 1	機器性能の向上	・エアコンの性能向上
			・ヒートポンプ給湯機の性能向上
			・テレビの性能向上
			・冷蔵庫の性能向上
	Step 2	保有台数の削減	・テレビの台数制限
			・冷蔵庫の台数制限
(C) 太陽光発電依存型電化シナリオ	Step 1	住宅設備の電化	・ZEH基準への住宅断熱改修に伴って 給湯・暖房設備の電化を促進
			・南向き太陽電池の発電容量を1kW増加
	Step 2	PV導入促進	・南向き太陽電池の発電容量を2kW増加
混合シナリオ	－		・シナリオ(A)～(C)のすべての対策を実施

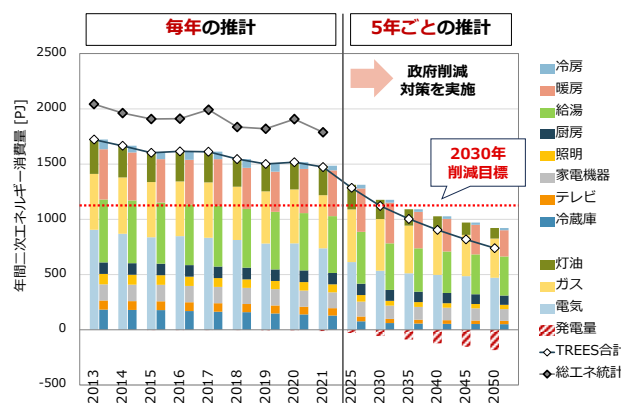


図16-2050年までの二次エネルギー消費量推計結果

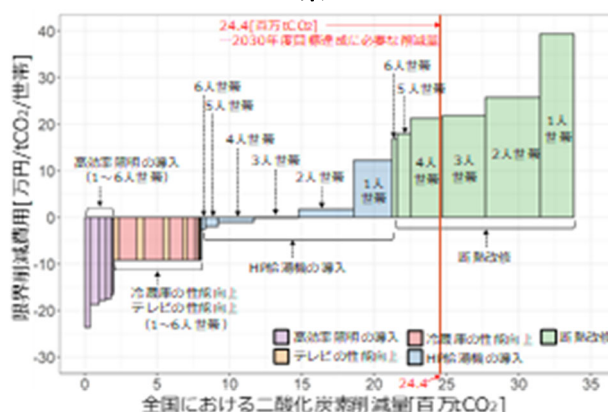


図17-世帯類型別限界削減費用とCO2排出削減量の関係

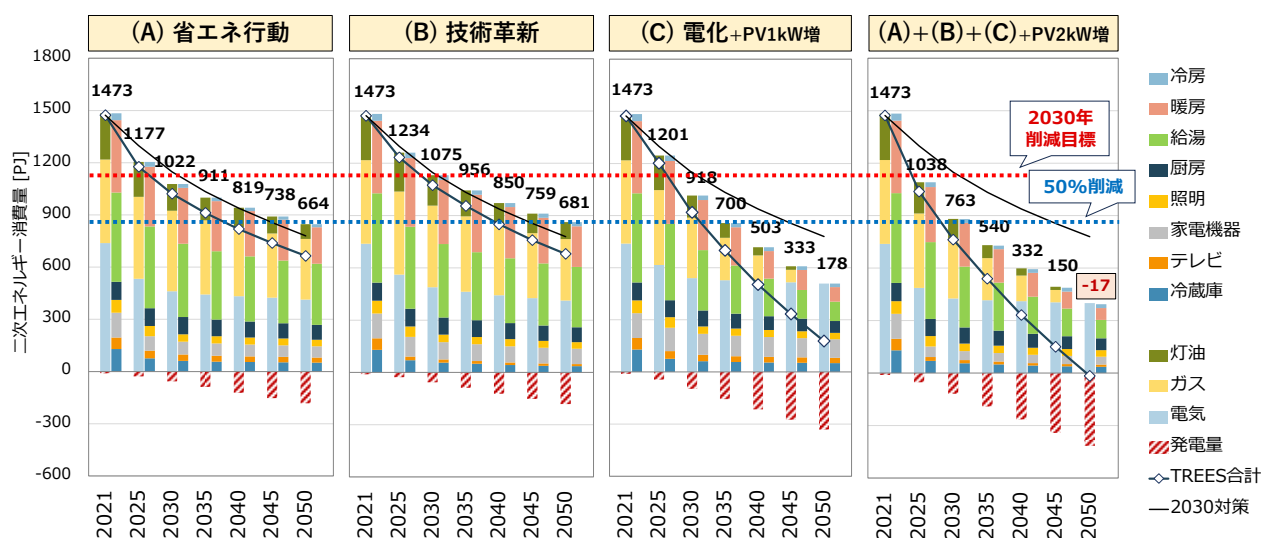


図 18-2050 年までのシナリオ別の二次エネルギー消費量推計結果

図 18 より、すべてのシナリオにおいて 2030 年削減目標を達成できることがわかった。また、室内設定温度の変更や温水便座などの家電機器の使用制限などの行動変容を想定したシナリオ(A)と機器の性能向上やデジタル化に伴う機能集約化による機器台数の減少を想定したシナリオ(B)では、2040 年度以降で 2013 年度比 50%以上の二次エネルギー消費量の削減が可能であるが、いずれのケースもエネルギー消費削減は大きく進まず、2050 年目標の達成は極めて困難である。一方で、住宅設備の電化と太陽電池の設置台数増加を想定したシナリオ(C)では、2035 年度以降で 2013 年度比 50%以上の削減が可能で、2050 年度のゼロエネルギー化達成には及ばないが、他シナリオより大きなエネルギー消費削減が進むことがわかる。また、すべての追加的対策を実施する混合シナリオでは、急速にエネルギー消費の削減が進むことに加えて、PV 発電量も大きく増加することから、2030 年度時点で 2013 年度比 50%以上の削減、2050 年度において家庭部門のゼロエネルギー化を達成できることがわかる。

(2-4) スマートメータデータを用いた逆問題解析、および寒冷地暖房考慮・世帯数による補正結果

スマートメータデータを用いた逆問題解析結果による行動など入力データの補正、および寒冷地暖房の考慮・世帯数補正による 2013 年度エネルギー消費量推計値の変化と 2013 年度の総合エネルギー統計との比較結果を図 19 に示す。

スマートメータデータを用いた行動・冷房の最適化により、2013 年度における二次エネルギー消費量の推計値が 3.5%増加した。これは深夜に活動する居住者の割合が多くなったことが要因である。ただし冷房は減少しており、補正によって冷房の使用頻度が低下したことが要因である。

行動・冷房最適化結果に加えて世帯数補正と寒冷地暖房の考慮をおこなった。4.の 2-4 で示した毎年の世帯数補正に加え、北海道の 30%の世帯に対してセントラル暖房システムの存在を考慮したことにより灯油消費量が 24PJ 増加し、当初約 2 割あった誤差が 1 割強に減少した。

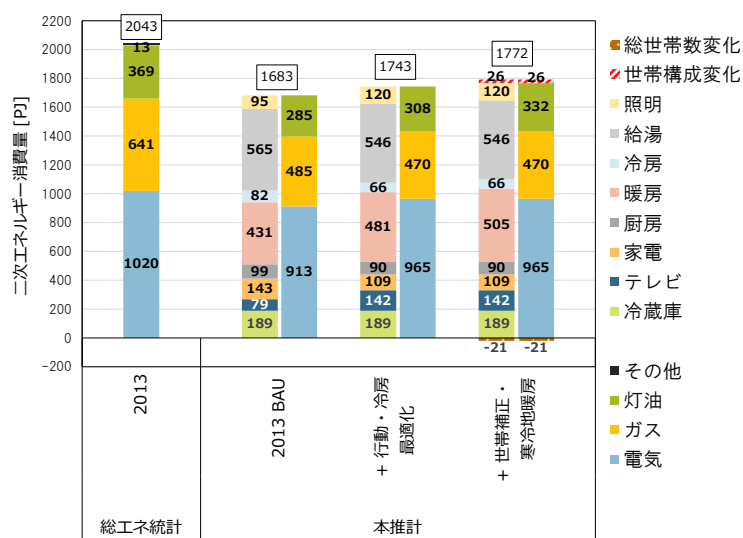


図 19-スマートメータ最適化結果および寒冷地暖房・世帯補正による 2013 年度エネルギー消費量推計結果

(3) 業務部門モデルの精度向上

(3-1) 経年変化の推計結果と精度評価

表3に示した分類を用いた施設用途区分のモデルによるエネルギー消費量と総合エネルギー統計との比較を図20に示す。図は9用途の二次エネルギー消費量内訳を示す。業務部門のCO₂排出量の推計値は2013年で174 Mt-CO₂であり、開発モデルはその他部門を除く排出量206Mt-CO₂の84%をカバーできている。ただし、電力消費が良い一致を示しているのに対し、燃料消費は全体として大幅に過小推計となった。モデルではコジェネレーション設備、医療施設の消毒や洗濯・洗浄等の設備、さらに、サービス生産用のエネルギー消費を考慮していないことが主要因として考えられるが、緩和策として政府が想定している業務施設のエネルギー効率向上対策が対象としているエネルギー消費についてはモデルで精度良く再現されていると考えられる。

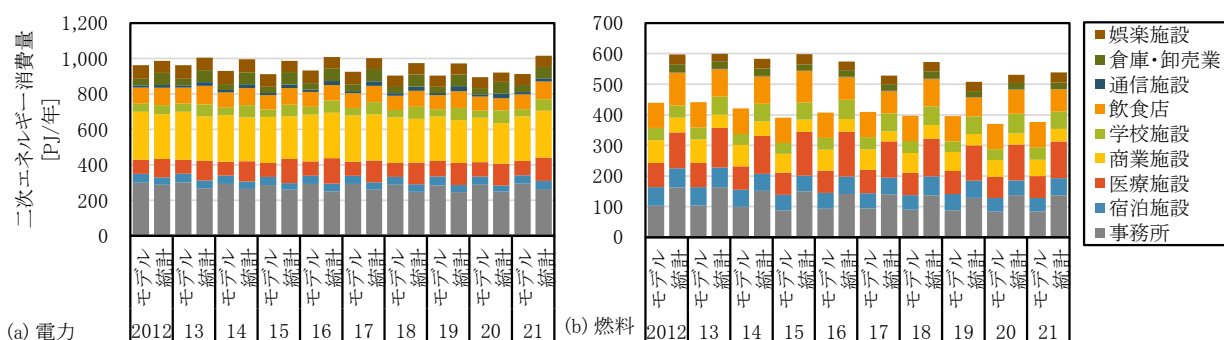


図20-業務部門の二次エネルギー消費とその内訳

計算対象とした業務施設用途についての2013年度から2021年度までの年間二次エネルギー消費量の変化を図21に示す。図では二次エネルギー消費量の変化を延床面積増加による増加（負の領域の床面積）と、エネルギー効率改善による削減（電力及び燃料）、2013年度との気象の差異（気象）要因に区分している。コロナ禍にあった2020年度と2021年度、エネルギー価格の高騰があった2015年度を除くと、モデルの結果はおおむね総合エネルギー消費統計（統計）の挙動と一致している。エネルギー効率向上による削減効果を正確に再現しているか確認するため、トップダウンモデルによる要因分解法を用いて、総合エネルギー消費統計の電力・燃料消費の変化量を床面積増減、経済活動変化、エネルギー効率変化、気象条件の4成分に分解し、エネルギー効率向上による年平均削減増加量を定量化した。表10に示すように、モデルによる推計結果はコロナ禍の期間を除いた総合エネルギー統計の年平均値の95%信頼区間の範囲に入っており、モデルによる推計値がエネルギー消費変化をある程度正確に再現していることを確認した。なお、気象の影響は家庭部門に比べると小さいが、床面積増の影響が大きいことは注意が必要である。

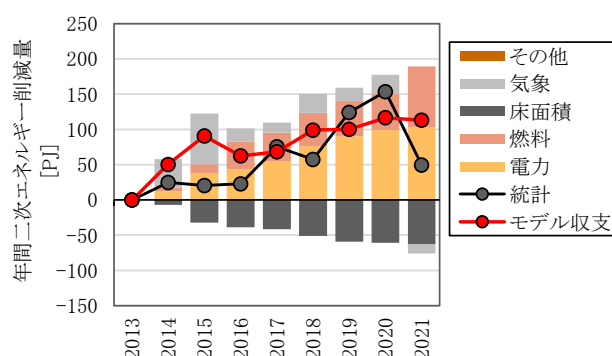


図21-業務部門のエネルギー消費、CO2排出量推計結果と実態値の比較

表10-エネルギー効率向上によりもたらされる年平均削減増加量

	電力[PJ/年]	燃料[PJ/年]
総合エネルギー統計(2013年～2021年)	-4.0 ± 11.0	2.2 ± 11.1
総合エネルギー統計(2013年～2019年)	9.5 ± 5.7	16.4 ± 8.7
本研究開発モデル(2013年～2021年)	12.4 ± 0.8	10.8 ± 1.7

(3-2) 2013年度からのエネルギー消費量変化の推計

地球温暖化対策計画の進捗評価において推計されている対策別二次エネルギー消費削減量を図22に示す。2013年度から2021年度は棒グラフで対策別の削減量を表しており、線グラフで政府進捗評価によ

る対策導入効果合計値を示す。なお、モデル内で考慮できていない対策（エネルギー管理等3つの対策）については、政府による推計値をモデルの推計値に加算している。また、政府推計では考慮されていない床面積増加によるエネルギー消費の増加影響について図中に負の領域で示している。2030年度では、モデルの推計値に加えて、地球温暖化対策計画の補足資料に記載されている対策項目別削減量を積み上げグラフにより示している（図中の「政府想定」）。この結果から得られた知見は次のとおりである。

- 2030年の推計では、モデルによる削減量の推計結果は、政府による推計よりも約60PJ/年小さいと推計された。延床面積の増加によるエネルギー消費の増加は約90PJ/年であり、この結果、約150PJ/年、政府推計よりも削減量は不足になると推計された。
- 2021年度までの進捗評価を見ると、モデルの推計結果は政府による進捗評価結果とおおむね一致した。この結果は政府の推計方法がある程度妥当なものであることを示している。
- 2030年度において特に差異が大きいと推計されたのは建築物の省エネルギー化（26PJ/年）、高効率給湯機の導入（18PJ/年）、機器のエネルギー消費の向上（34PJ/年）である。建築物の省エネルギー化について、モデルでは2010年以降の技術採用傾向の継続を想定したが、それでは2030年目標の達成が困難であり、さらなるエネルギー性能向上が必要であることが明らかとなった。なお、モデルの推計では空調・給湯関連設備の採用について2010年以降の技術採用傾向の延長を考慮し、建築物省エネ法の改正による省エネ基準の引き上げの効果は含まれていない。高効率給湯機の導入については、ヒートポンプ給湯機の普及によってもたらされる削減に大きな差異が生じた。モデルでは空調設備と同様に竣工設備データによって設備採用確率を表す回帰モデルを作成してストック推計に用いた。対象ストックの竣工設備データサンプルにヒートポンプ給湯機を設置したものが少なかったことに起因する。また、今回考慮できなかった施設用途（温泉施設等）にヒートポンプ給湯機が導入され、推計から漏れてしまった可能性もある。機器についてはコンセント機器の効率が40%改善することを想定したが、推計結果よりも小さい推計結果となった。
- 政府推計において対策項目別の推計結果に誤差が生じる要因が確認された。政府推計では、照明一台当たりの稼働時間を3000時間と想定しているが、多くの業務施設では3000時間以上の稼働があり、一台当たりの削減量は政府推計の想定よりも大きいと推計された。一方で、2021年度までは進捗評価による削減効果推計結果はモデルの推計結果よりも大きく、普及速度が過大に見積もられている可能性がある。建築物の省エネルギーにおいて最も大きな効果をもたらしている要素は熱源機器の効率向上と熱源システム構成の変化（個別熱源方式の普及や緩やかな電化傾向）であった。省エネルギー手法の普及や断熱性能向上によりもたらされている効果はある程度限定的であると推計された。

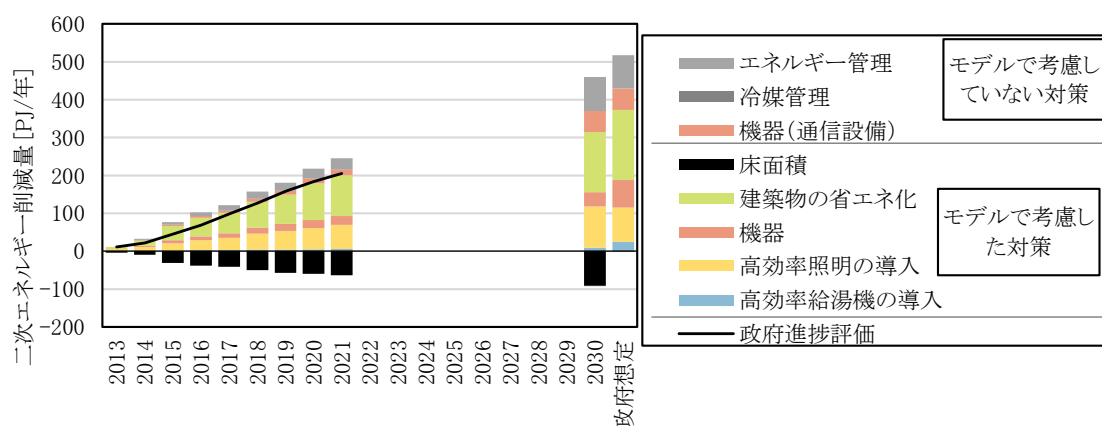


図22-地球温暖化対策計画業務部門進捗評価の比較

（3-3）2030年度に向けた削減可能性評価と追加対策の検討

前節で推計されたエネルギー消費の変化によってもたらされるCO₂排出量の変化を推計した。結果を図23に示す。左図では2013年度からの追加的な変化を項目別に示している。本研究の対象ストックに加えて、業務その他部門に含まれるその他のエネルギー消費と、対象ストックの過小推計分に伴うCO₂排出量

を凡例「その他」で示しており、これらは2030年度までエネルギー消費量が変化しないと想定した。この結果、2030年度のCO₂排出量は133MtCO₂/年と推計され、17MtCO₂/年が2030年度目標に対して不足と推計された。ただし、政府推計ではモデルで考慮できなかった対策において11.6MtCO₂/年の削減があると推計されており、これを加えると不足は6MtCO₂/年と推計された。右図では、追加的な対策についての検討結果を示す。図中左から、全空調熱源機器をトップランナー水準のものに置き換える対策、空調・給湯熱源を電化する対策、空調搬送系統関連省エネルギー手法の普及（換気の全熱交換器、変風量方式採用など）、壁体・窓の断熱強化、これら全手法の組み合わせであり、全手法で13MtCO₂/年の削減ポテンシャルがあることがわかった。一方で、断熱強化策は普及に時間を要するなどの特性があり、特に熱源効率向上、熱源電化が追加対策として有効であると考えられる。

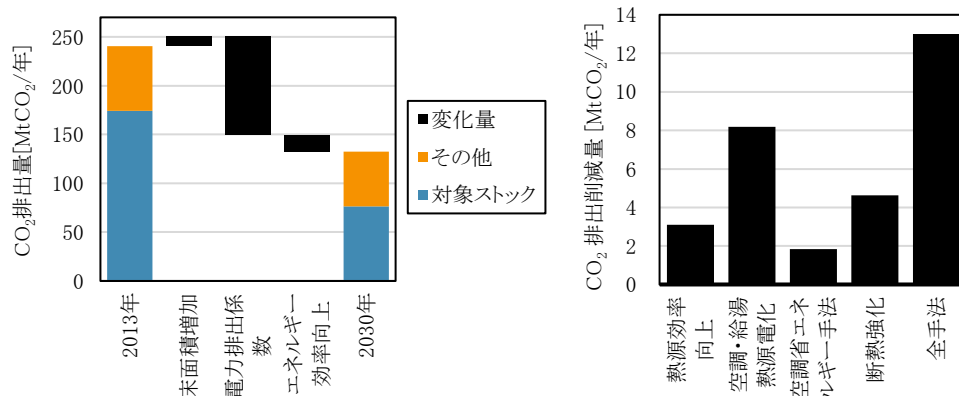


図23-業務部門のエネルギー消費の将来推計結果

(4) アンケートデータによる分析

電力・ガス取引監視等委員会による「電力取引報結果」によると、関西電力管内における2024年1月時点での低圧分野の新電力シェアは販売電力量ベースで27.6%である。同供給区域内で実施した本アンケートでは、新電力の契約世帯数ベースでのシェアは33.5%で、うち大阪ガスが18.4%であった。図24には調査対象自治体の契約電力会社のシェアを示している。この結果より、おおまかな傾向は類似しているものの、淡路島のみ大阪ガスの供給区域外であることからシェアが異なっていることがわかる。また図25に世帯年収別の契約電力会社のシェアを示す。1,500万円以上のサンプル数が全回答件数の2.1%であり、結果の信頼性が低いことを考慮すると、世帯年収が高いほど関西電力から新電力に契約を切り替えている状況が読み取れる。世帯年収と電力消費量に一定の相関関係があると仮定するならば、各自治体が対策の進捗状況を把握するうえで有用な情報であるといえる。図26には対象自治体ごとの給湯設備のシェアを示す。こちらも同様に大阪ガスの供給範囲外である淡路島においてガス給湯器のシェアが小さく、それに応じて電気ヒートポンプ式給湯器や灯油給湯器の割合が大きくなっていることがわかる。また生駒市は他の大阪ガス供給区域内の自治体に比べて電気ヒートポンプ式給湯器の割合が高

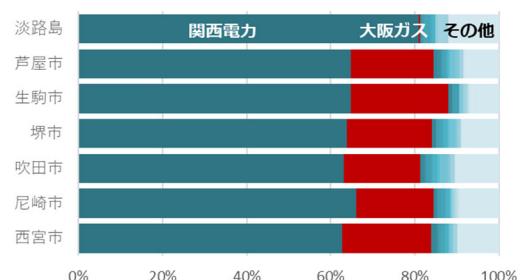


図24-対象自治体の契約電力会社のシェア

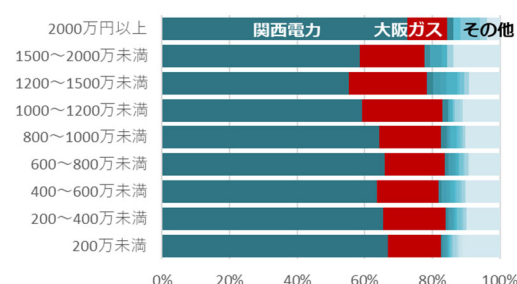


図25-世帯年収別の契約電力会社のシェア

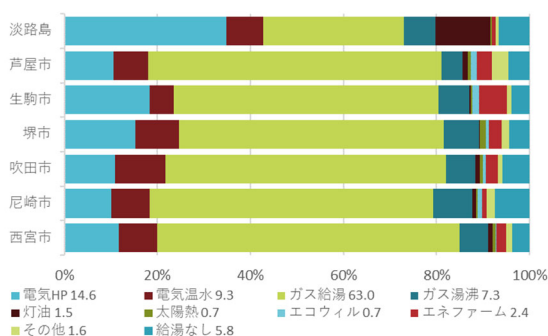


図26-対象自治体の給湯設備のシェア

く、別の調査項目において太陽光発電設備の設置件数が多いことも確かめられている。このことから、地域特性における明確な差異の少ない自治体間においても、保有設備ストックに関する考慮すべき特徴が存在する可能性が示された。このような情報は家庭CO₂統計においても一定程度取得されているが、そのサンプル数は全国の約5,000万世帯に対し毎年1万世帯程度である。一方、今回のWEBアンケート調査では特定の自治体に対して人口10万人あたり概ね300サンプル程度を取得することが可能であった。エネルギー需要予測及び脱炭素の進捗評価を実施するにあたり、このような粒度でのデータ取得は地域特性の再現において重要であると考えられる。

(5) 地域のエネルギー・カーボンマネジメントへの応用

これまでの報告では、国を対象としてエネルギー・カーボンマネジメントをおこなう事例について分析・シミュレーションの結果を示してきた。これらの手法の自治体への適用について以下で考察する。まず、基礎自治体単位では「総合エネルギー統計」のような精度の高い統計が存在せず、地域全体のCO₂排出量を評価する上では電力会社別の電力消費割合が必要となるがその統計も存在しない。

本研究で示したスマートメータによる居住者行動などのデータ、(4)で示したアンケートデータは、自治体の特性に応じたシミュレーションを行うための入力条件を備える上で有力な手段となっている。例えばPVや給湯器の選択は本研究で明らかとなったように脱炭素に有効な電化の進展の鍵となるが、アンケートに見るように自治体で大きな差が生じている。このようにアンケート・スマートメータデータ・シミュレーションモデルの3者を組み合わせる図1のデジタルツインモデルの開発は、近年利用可能となった自治体単位の受電データ公開やスマートメータデータの公開と相まって、自治体の温室効果ガス排出削減の有効なツールとなり得ると考えられる。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況>・・・・・・・・・・・・・・ [1. 目標を大きく上回る成果をあげた](#)

「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」

全体目標	全体の達成状況
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。	家庭部門モデル、業務部門モデルともに、カーボンマネジメントシステムとして求められる精度および各種温室効果ガス削減対策が反映できる機能を備えることができたと考えている。家庭部門、業務部門とも、マネジメントのPDCAサイクルにおいて、本研究以前より実施していたPlan(温暖化対策計画による2030年温室効果ガス削減量の達成可能性検証)に加え、Check(毎年の気象条件の影響などを考慮した、対策の効果の定量化と2030年削減対策達成の見通しの提示)、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を実証し、本研究で開発したツールで2030年までの温室効果ガス排出削減目標の達成可能性を評価することができた。両部門とも若干の遅れが見られ、追加対策の検討結果も示している。 更に、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に関わる行動(睡眠、テレビ視聴、冷房使用)等の実態を明らかにするだけでなく、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ことは本研究の大きな成果である。また

	独自のアンケート調査を実施し、自治体でこのシステムを実際に運用していく中で、どのようなデータを収集すべきかについても提言することができた。
--	---

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「全体目標と同様」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
全体目標と同様	全体目標と同様

5－3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

日本の家庭部門、業務部門を対象としてエネルギー需要を推計するモデルを確立した。ボトムアップモデリング手法を採用したモデルとしては日本で唯一のものである。世界では米国、欧州、中国において建築ストックを対象とするモデルが開発されているが、1年ごとの人口変化、住宅・業務施設ストック、機器や省エネルギー対策技術の更新を模擬するための方法論は存在していなかった。本研究ではこの方法論を確立し、デジタルツインとして地球温暖化対策の進捗を評価することを可能とした。既往研究では断熱性能の向上と空調・給湯熱源の電化が主な対応技術として考慮されてきたが、家電や多様な省エネルギー技術、設備種別の採用状況の変化を考慮することができるようになった。開発手法は考慮するパラメータやモデル化の手法を調整することで海外の文脈にも適用可能であり、方法論の確立により、他の地域においてもエビデンスベースの地球温暖化対策評価が可能になると考えられる。

また、スマートメータデータを教師データとしてボトムアップシミュレーションモデルを逆問題解析し、睡眠時間などを推計する試みは世界的に見ても前例がなく画期的な手法である。

<行政等に既に貢献した成果>

環境省では令和3年度より、地球温暖化対策計画の進捗状況を評価するため、中央環境審議会地球環境部会の下に、地球温暖化対策計画フォローアップ専門委員会を設置し、下田が委員長を担当している。（<https://www.env.go.jp/council/06earth/yoshi06-23.html>）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、本研究成果である家庭部門・業務部門モデルの試算結果を提示（下田委員長説明資料）し、議論に供した。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

大阪府環境審議会では、令和3年6月8日に「建築物の環境配慮のあり方について」という答申をおこなっており、その中では

- 1) 非住宅の法律に基づく条例による規制については“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、延面積が一定規模以上（2000 m²以上を予定）を対象に、外皮性能を付加し、建築基準関係規定化に向け先進的に取り組むべきです。
- 2) 住宅への府独自条例による規制については、“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、一定の住戸面積、かつ一定規模の住戸数以上の住棟を対象とし、外皮性能及び一次エネルギー消費量を適合基準とすべきです。一定の住戸面積、かつ一定規模の住戸数以上の住棟に関する考え方として、（中略）75 m²以上を平

均の住戸面積とし、（中略）一棟あたり 100 戸以上の住棟を予定に、外皮性能及び一次エネルギー消費量の適合義務化に取り組むことなどが考えられます。

となっている。自治体の温室効果ガスマネジメントに本研究の成果を応用する一例として、上記の政策が実施された場合にどの程度の規制の効果が得られるのかについてのエビデンスを提供することを目的として、シミュレーションを実施し、大阪府の政策担当者にその結果を提示し、本研究の成果の活用に関する可能性をヒアリングした。

(1) 住宅に関するシミュレーションとヒアリングの結果

上記大阪府答申の住宅に関する答申内容を条例として規制した場合の大阪府の温室効果ガス排出に与える影響を評価するため、TREESで大阪府を対象に①BAUケース、②69㎡以上の新築義務化、③99㎡以上の新築義務化、④69㎡以上の全ての集合住宅の断熱改修、⑤99㎡以上の全ての集合住宅の断熱改修のそれぞれのケースに対するシミュレーションを実施した。上で、TREESでは面積区分が75㎡では区切られていないため、69㎡以上と99㎡以上の2ケースを検討している。各ケースの2030年の冷暖房による年間二酸化炭素削減量を図27に示す。

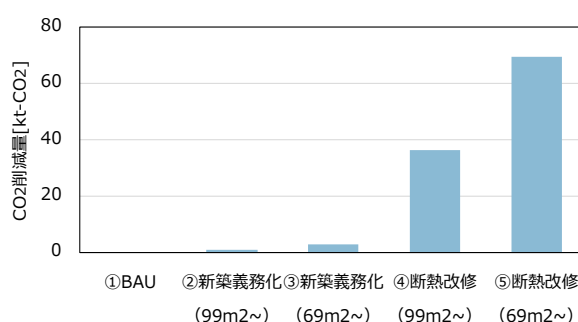


図27-2030年における各ケースの冷暖房による年間二酸化炭素削減量

2030年、69㎡以上を対象にすると新築義務化で3000t-CO₂の削減、断熱改修で69000tとなり、新築義務化の効果は大阪府家庭部門全体のCO₂排出量の0.04%、全ての69㎡以上の集合住宅の断熱改修で0.97%となった。住宅が長期間使用されることを考慮して、2022年以降69㎡以上の集合住宅への外皮性能基準適合義務化による効果を住宅寿命40年として積算すると一次エネルギー削減効果で787TJとなるが、これは大阪府家庭部門全体の年間一次エネルギー消費量の0.7%にしかない。

以上の計算結果を持参して、2021年10月21日に大阪府庁を訪問し、建築指導室・エネルギー政策課の担当者とディスカッションをおこなった。当日得られた大阪府担当者のコメントのうち主なものは以下の通り。

- ・ 推計結果では政策の効果が小さいことを示しており、大阪府の当初の想定とは異なった。
- ・ 効果を出すために、どこまで高い断熱水準が必要か検討できるか？
- ・ 高価なマンションであれば省エネ負担が可能と考え、大型集合住宅を対策にしている。
- ・ 政策反映のためには費用対効果の定量化が必要である。

(2) 業務施設に関するシミュレーションとヒアリングの結果

2018年度に建築申請された非住宅建築物において外皮基準を満たさなかった建築物の比率は事務所、宿泊施設、医療施設は5%未満、商業施設は約25%であった。また、商業施設以外は外壁・屋根、窓の断熱強化により外皮基準を達成可能であるが、小規模（延床面積300㎡以上2000㎡未満）の商業施設では基準達成が困難であることが確認された。このことから、条例による小規模商業施設以外の外皮基準の設置は実施可能であり、小規模商業施設では大幅な設計変更を伴うため、実施が困難であることがわかった。

次に、業務施設の代表モデルを用いて外皮基準強化による省エネルギー効果を確認した。事務所ビルの評価結果を図28に示す。外皮基準は多くの施設で

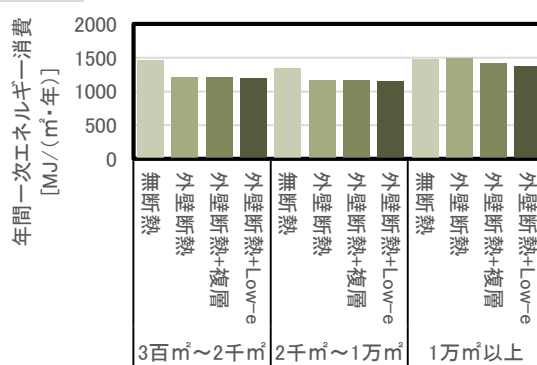


図28-外皮性能変化によるエネルギー消費量の変化（事務所）

外壁・屋根の断熱、複層ガラスの採用により達成される。断熱対策を行っていない施設（凡例無断熱）と比較すると、延床面積300㎡から2000㎡の小規模事務所では一次エネルギーでの省エネルギー効果は外壁・屋根の断熱で15%、追加で複層ガラスを採用することで16%と推計された。窓の断熱効果は外皮における窓面積比率が比較的大きい宿泊施設、医療施設で大きい。

以上の計算結果を持参して、2022年7月7日に大阪府庁を訪問し、建築環境課、脱炭素・エネルギー政策課の担当者とディスカッションをおこなった。当日得られた大阪府担当者のコメントのうち主なものは以下の通りである。

- ・ 大阪府は事業者へのヒアリングを行い、小規模施設では外皮基準への適合が困難であるという意見が出されていた。商業施設において外皮基準への対応が技術的にも困難であることがわかったことは有意義であった。
- ・ 断熱性強化によるU値の変化は定量化されているが、それによる省エネルギー効果に関する情報は利用可能なものがなかった。それを定量的に示したことは有意義である。
- ・ 外皮基準を達成できない建築物の比率×断熱実施時の省エネルギー効果により建築物全体での効果を評価することができるが、外皮基準達成義務化による効果がそれほど大きくないことを定量的に示したことには意味がある。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	5
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	1
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	3
口頭発表（学会等・査読なし）：	3 0
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	0
マスコミ等への公表・報道等：	0
研究成果による受賞：	3
その他の成果発表：	0

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Y. Shimoda, M. Fujiwara, T. Nakanishi, Y. Yamaguchi, H. Uchida (2022) Energy and carbon management system for a city and a nation. ECEEE 2022 Summer Study Proceedings
3	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://doi.org/10.24778/jjser.44.6_274
4	H. Uchida, K. Kishimoto, K. Nishizawa, S. Yoshiyuki, Y. Yamaguchi, K. Togawa (2023) Aggregated Smart Mater 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 ,
5	Y. Yamaguchi, T. Nishijima, X. Zhang, R. Shinohara, Y. Hahashi, H. Uchida, Y. Shimoda (2024) Building stock energy modeling to assess annual progress in stock energy efficiency and carbon emission reduction of commercial building. Applied Energy (submitted)

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

(1) EDITS

研究チームは、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EDITS（Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations <https://iiasa.ac.at/projects/energy-demand-changes-induced-by-technological-and-social-innovations-edits>）に参加し、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している。

(2) 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Yan Jun 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。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
IIASA（国際応用システム分析研究所）	Schlossplatz 1 A-2361 Laxenburg, Austria
中国上海交通大学Institute of Refrigeration and Cryogenics	中国上海市華山路1954号

8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
下田 吉之	大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了 工学博士 大阪大学助手、准教授を経て現在、同大大学院工学研究科教授 中央環境審議会地球環境部会臨時委員、日本学術会議会員 専門は都市エネルギーシステム、研究テーマは温暖化対策評価、スマートビルの検討など。

Ⅱ． 成果の詳細

Ⅱ－１ サブテーマ１「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」

[サブテーマ１要旨]

現在、日本では地球温暖化対策計画に基づき、2030年度までに2013年度比46%の温室効果ガス排出削減を目指しているが、進捗状況の詳細な要因分析が行われておらず、計画の効果を評価するのが困難である。特に、民生部門は気象や地域特性による影響が大きく、全国規模の普及率のみでは削減量を評価できない問題がある。また、地方自治体ではエネルギー市場の自由化によりエネルギー消費量の把握が難しくなっている。

本サブテーマでは、民生部門の温室効果ガス排出削減を確実に進めるためのマネジメントシステムを開発することを目的とし、地球温暖化対策計画や地方公共団体実行計画に基づく毎年の民生部門からのCO₂排出削減量を、①ボトムアップ型エネルギー最終需要シミュレーション、②アンケート調査、③スマートメータデータの3つのツールから構築したサイバーフィジカルシステムを用いて分析し、対策の進捗状況を詳細に把握することを目指す。

スマートメータデータを利用した逆問題解析では、行動パラメータを校正し、家庭部門の推計精度が大きく向上した。特に深夜帯での精度向上が顕著で、睡眠時間の短縮が大きく寄与した。空調稼働についても同様の最適化を実施し良好な精度を示した。

家庭部門モデルの精度向上では、2013年度を基準とした増減に注目し、モデルによる推計結果をエネルギー庁および環境省の増減要因分析と比較した結果、傾向は概ね一致した。2030年度に向けた対策進捗評価では、2021年度時点での二次エネルギー消費削減量は目標値に対して約88%の達成率であり、さらなる対策の強化が必要であることがわかった。2050年度までのエネルギー消費量推計では、現行の対策では目標達成が困難であることが示唆され、追加対策として住宅設備の電化と太陽電池の設置が効果的であることが示された。

業務部門モデルの開発では、エネルギー消費量の推計結果と精度評価を行い、電力消費は良好な一致を示す一方、燃料消費は過小推計された。2013年度からのエネルギー消費量変化の推計では、政府推計よりも削減量が不足しており、特に建築物の省エネルギー化と高効率給湯機の導入、機器のエネルギー消費向上が重要であることが示された。2030年度に向けた追加対策として、全空調熱源機器の効率向上や熱源電化、断熱強化が提案され、これら全手法で大きな削減効果が期待できることがわかった。

地域のエネルギー・カーボンマネジメントにおいては、自治体毎の特性を正確に捉えることが重要である。本研究では、前述したスマートメータによるパラメータ校正に加え、アンケート調査による詳細なデータ取得により地域特性の把握を試みた。これらを用いた高精度なシミュレーションモデルは、自治体の特性に応じた温室効果ガス排出削減対策の有効なツールとなることが示された。

１． サブテーマ１研究開発目的

本研究では、地球温暖化対策計画や地方公共団体実行計画（区域施策編）に基づく毎年の民生部門からのCO₂排出削減量を、従来のエネルギー統計に加えて①研究チームで開発した、居住者行動や気象データ、建築の性能等に基づき機器毎の稼働を模擬し、気象の差異や地域内の建築・世帯のエネルギー消費特性の分布を再現できるボトムアップ型エネルギー最終需要シミュレーション、②環境省の家庭CO₂統計等アンケート調査、③大量のスマートメータデータの3つのツールから構築したサイバーフィジカルシステムを用いて分析し、対策の進捗状況を詳細に把握し、国や自治体の計画の確実な達成に寄与することを目指し、以下の課題を解決していく。

- ・ 年々の気象変化影響は、温暖化対策計画が想定する1年当たり削減量の数倍あり、シミュレーションで気象影響を除去する手法を開発する。
- ・ 高効率機器・省エネ建築の導入効果について、従来の全国レベルの普及量では地域や世帯特性等の特性が反映できず、アンケートで地域別、世帯・建物類型別の導入量を明らかにし、これらの差異を考慮した効果を算出する。また、スマートメータデータのロードカーブを経年で比較し、シミュ

レーションを援用して太陽電池普及状況や特定機器の電力消費変化を同定する手法を開発する。

- ・ エネルギー市場の自由化により、電力会社の選択がCO₂排出量に影響を与えるが、比較的消費の大きな世帯が新電力に切り替える傾向がある。アンケート情報から世帯特性別の電力会社の選択状況を調査し、CO₂排出の増減に与える影響を評価する。

上記目的のため、スマートメータデータからシミュレーション等を援用し機器エネルギー消費を推計する手法など3つのツールを相互に活用する分析手法を確立する。

同時に、国および地方自治体の民生部門カーボンマネジメント状況を調査し、望ましいマネジメントのあり方を提言するとともに、必要なアンケートやデータ収集の要件を示す。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「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」
サブテーマ1 実施機関	国立大学法人大阪大学
サブテーマ1 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CO ₂ 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。

3. サブテーマ1 研究開発内容

研究プロジェクトの全体像を図1に示す。国や自治体は地球温暖化対策計画や地方公共団体実行計画(地域施策編)に基づき温暖化対策を進め、その進捗を地域のエネルギー消費量や温室効果ガス排出量により評価している。しかし、観測されるエネルギー消費量は、購買行動・機器保有状況・機器稼働状況など温暖化対策が働きかけている事象だけでなく、年々の気象条件や人口動態、温暖化対策と直接関係しない技術の変化やコロナ禍によるテレワークの普及など様々な要因の影響を受けており、対策による効果を正しく評価することが難しい。

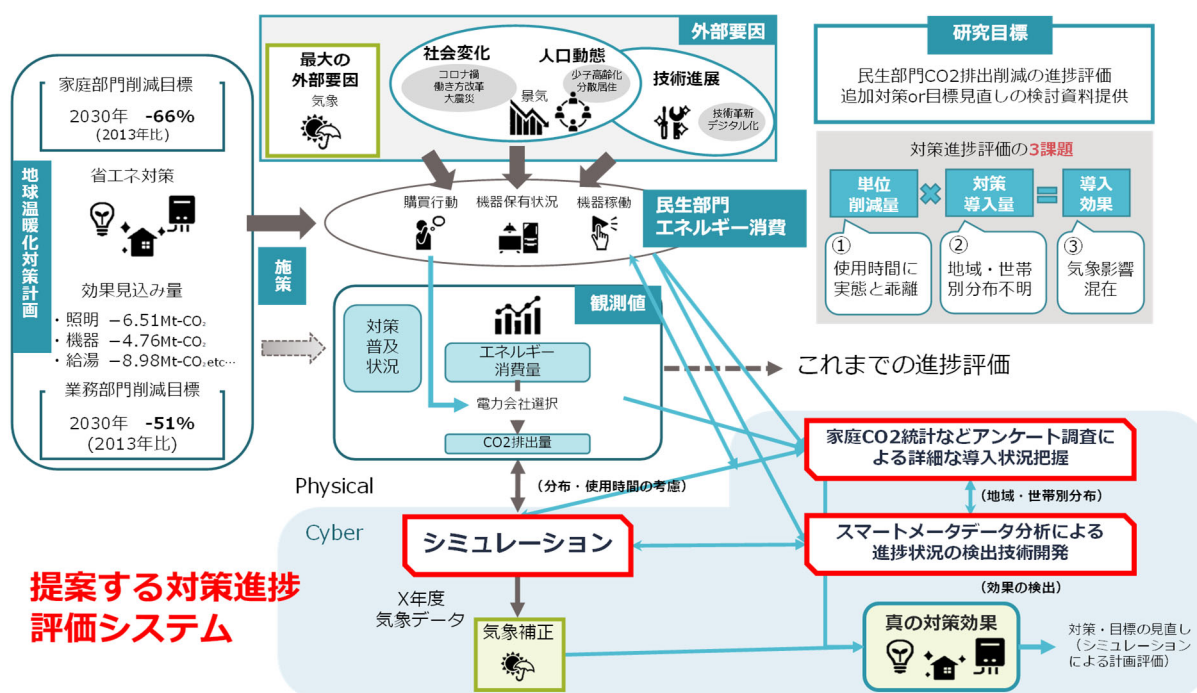


図1-研究プロジェクトの全体像

そこで本研究では以下の課題に取り組んだ。

- ボトムアップシミュレーションモデルにより、気象や行動の変化、人口動態の影響などを考慮した、真の対策効果を評価する。
- スマートメータデータにより、ボトムアップシミュレーションモデルのパラメータを補正すること及び、経年的な観察によるエネルギー消費状況変化を検出する手法を開発する。
- 環境省の家庭CO2統計のようなアンケートデータによって、機器の地域別世帯類型別保有状況など、ボトムアップシミュレーションの入力条件の精緻化を図るとともに、電力小売り会社の選択状況など温室効果ガス排出に影響を与える要因の分析をおこなう。

4. サブテーマ1 結果及び考察

(1) スマートメータデータを利用した逆問題解析

(1-1) 中間期の最適化結果

最適化によるロードカーブの変化を図5に示す。ここで、各色面はTREESによる対応する用途の電力消費量の推計値で、破線は最適化前のTREESによる電力ロードカーブの推計値、実線はスマートメータによる実測値で、いずれも2人世帯・集合・中間期の平均値である。図5より全時刻でTREESによる電力消費量の推計値が大きくなり、推計精度が高まったことがわかる。特に20時から6時までの深夜の時間帯において顕著である。その一方、8時から12時までの午前中の時間帯において若干の過大推計となった。

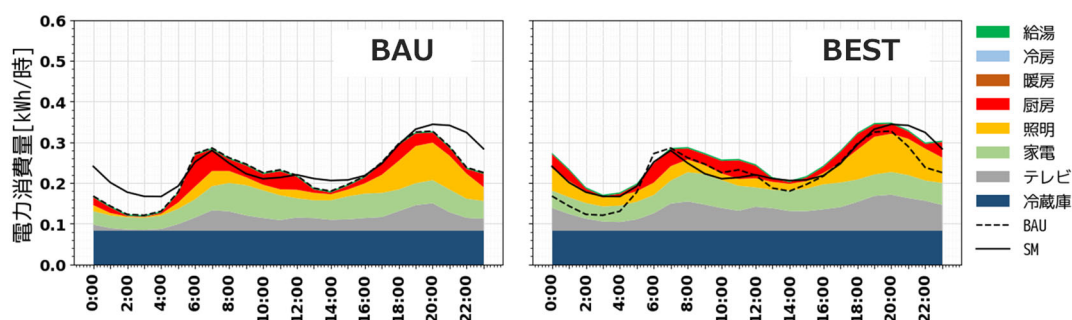


図5-最適化によるロードカーブの変化

(1-2) 最適化結果の妥当性検証

較正されたパラメータの妥当性について考察する。最適化対象のうち統計や実測データ等が存在する睡眠時間に係るパラメータの妥当性を検討した。睡眠時間について2人集合世帯と2人戸建世帯、3-4人集合世帯、3-4人戸建世帯の各世帯類型における睡眠時間の中央値を表5に示す。2人集合世帯と3-4人戸建世帯では大きく減少しているのに対し、2人戸建世帯と3-4人集合世帯では若干の減少にとどまっている。

睡眠時間を調査する生活行為生成パラメータの生成に用いた社会生活基本調査以外の信頼できる調査として、株式会社C2による熟睡アラーム睡眠統計がある。これは同社が配布するアプリより得られたユーザ9282人のデータをもとに作成されたもので、アンケート調査とは異なりスマートフォンのアプリを活用した実測に基づいたものである。第1回熟睡アラーム睡眠統計による性別及び年代ごとの平均睡眠時間を表6に示す。表6より、全体の平均睡眠時間は352分であり、国民健康・栄養調査の360分から420分よりも短い。これはアンケート調査と実測のデータ収集方法の違いによるものであると考えられる。表5に示した各世帯類型における睡眠時間の中央値と比較すると、2人集合世帯と3-4人戸建世帯では大幅に近づき、較正結果は妥当であると考えられる。その一方で、2人戸建世帯と3-4人集合世帯では乖離が大きい。これは最適化が局所解に陥ってしまったことを示しており、今後妥当な制約条件を設定することで回避できるものと考えられる。

表 5-各世帯類型における睡眠時間の中央値

対象	中央値
BAU	460 分
2 人集合	355 分
2 人戸建	430 分
3-4 人集合	450 分
3-4 人戸建	365 分

表 6-第 1 回熟睡アラーム睡眠統計による性別及び年代ごとの平均睡眠時間

区分	男性	女性
70代以上	391分	372分
40代	343分	352分
20代	341分	357分
全体	352分	

(1-3) 冷房期の最適化結果

2人世帯における冷房期の最適化結果を表7、21-11時における冷房 ON 確率の変化を図6に示す。また最適化前後のロードカーブを図7に示す。全ての時間帯において大きく誤差が改善されており、電力消費量がよく一致している。6時頃や12時頃に過大推計となっているが、これは中間期においても同時時間帯で過大推計となっていたため、冷房期最適化後にもその影響が出たものと考えられ、冷房期と中間期の主な差分である冷房や冷蔵庫の電力消費量の推計としては若干過小推計であるとみなせる。

図6に示すように居間において冷房 ON 確率が50%になる室温が最適化後32℃と高い値を示している。最適化後の居間における冷房開始室温別 ON 回数の頻度分布を図8に示す。冷房 ON 時の室温は32℃以下がほとんどである。これは冷房 OFF 時に5分おきに稼働判定を行い、その度に冷房 ON 確率が評価されるため確率が低くても ON となりやすいためである。就寝時冷房使用では、「使用しない」が75%と大きい。これはエアコンの電力消費量が比較的小さい自動運転機能や除湿機能などを考慮できていないことが要因として考えられる。本最適化はエアコンの冷房機能のみを使用する前提であり、誤差の要因となっている。また、「切タイマー使用」が2%と小さい。これは中間期最適化後の過小推計分を冷房の電力消費量によって調整したため、実際に切タイマーが使用されていても「常時使用」に割り当てられたと考えられ、「切タイマー使用」の実際の確率は最適化結果よりも高い可能性がある。これは中間期の最適化における誤差をさらに小さくすることで改善されることが考えられる。

表7-冷房期最適化による各パラメータの変化

		BAU	最適化結果
就寝時 冷房使用	使用しない	14%	75%
	切タイマー 使用	57%	2%
	ずっと使用	29%	23%

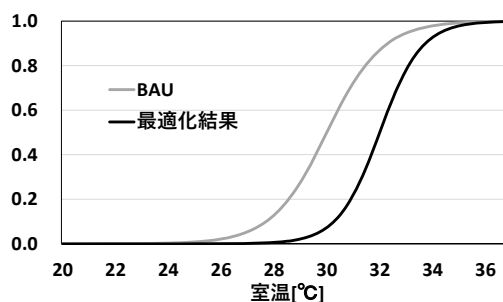


図6-居間（21-11時）の冷房ON確率の変化

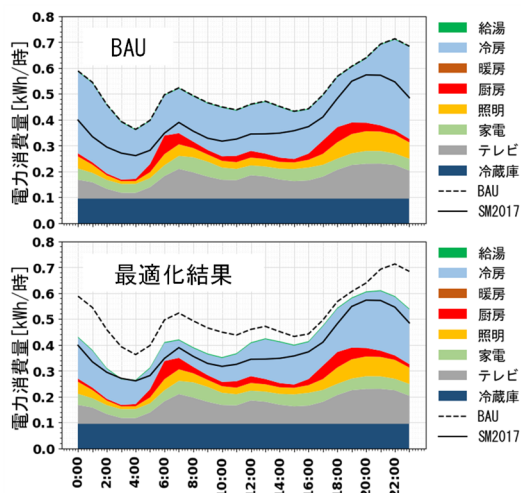


図7-冷房期最適化前後のロードカーブ

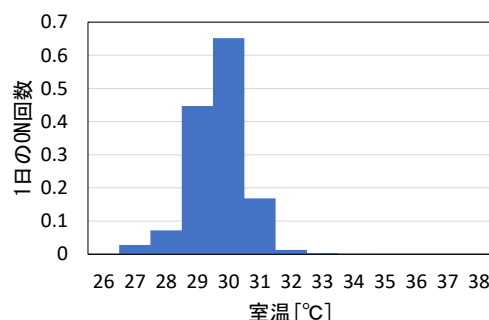
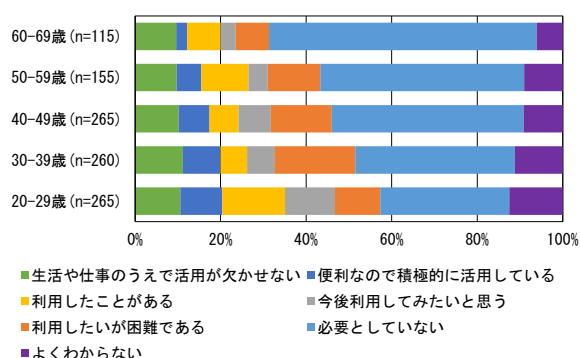
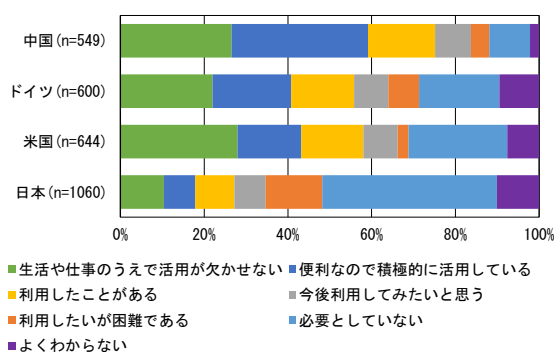
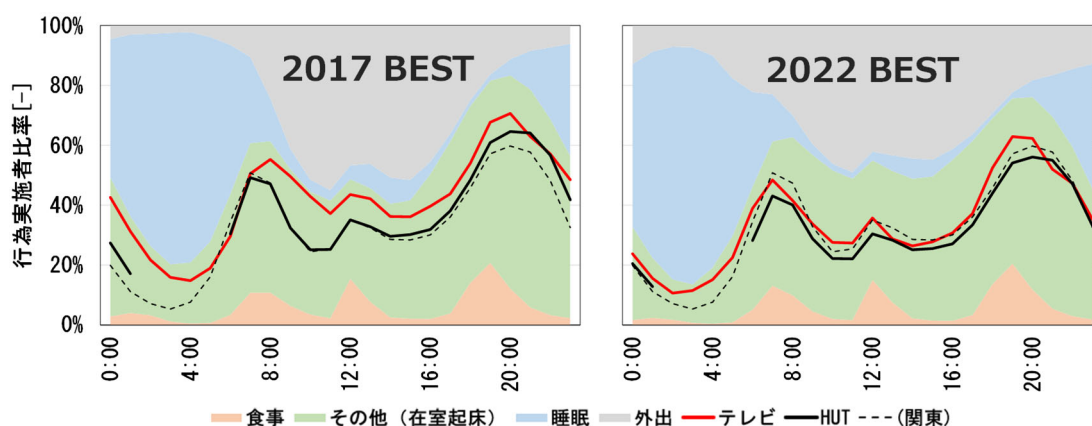
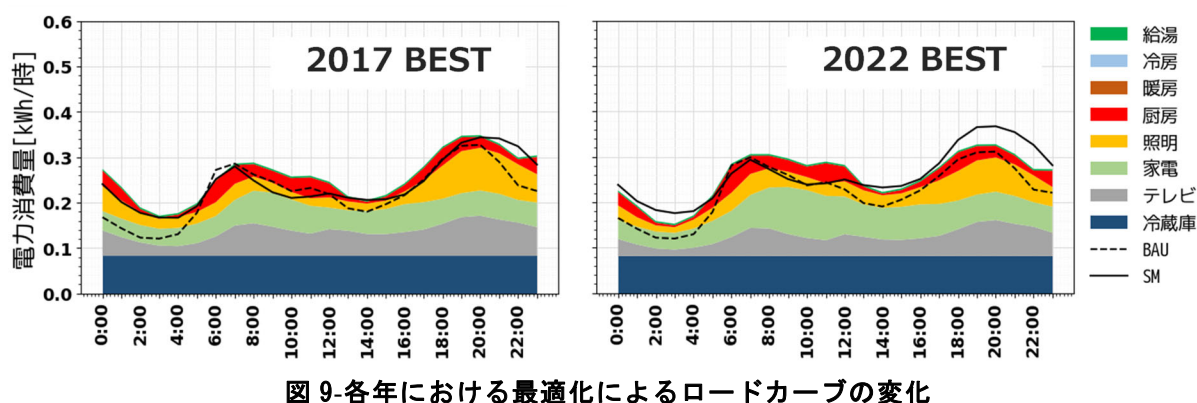


図8-冷房開始室温別 ON 回数の頻度分布（居間）

(1-4) コロナ禍による行動変容の分析

本研究では、パラメータを較正する枠組みを応用し、スマートメータデータの経年変化からエネルギー消費の発生構造の変化を検知する試みの一例としてコロナ禍による行動変容を取り上げる。TREESモデルの推計には、対応する年度の気象条件を用いている。2022年度における最適化の対象期間は、2017年度と同様に中間期とし、2022年度5月6日から6月21日と9月27日から10月21日までの平日とした。図9に結果を示す。各色面はTREESモデルによる対応する項目の電力消費量の推計値で、破線は最適化前のTREESモデルによる電力消費の総量の推計値、実線は各年のスマートメータによる実測値で、いずれも2人集合世帯で中間期の平均値である。この最適化後の行動の2017年度と2022年度の結果の差が、コロナ禍による行動変容と考えることができる。

各年における最適化による居住者行動の変化を図10に示す。ここで、各色面はTREESモデルにおける対応する項目の行為実施者比率で、赤実線は最適化されたテレビ稼働率、黒実線は各年のテレビ調査白書による関西地区の時間帯別総世帯視聴率（Households Using Television, HUT）の平日平均、黒破線は2019年7月1日から9月29日までの関東地区の総世帯視聴率の平日平均である。2022年度の方が2017年度よりも8時から18時までの昼の時間帯において仕事や学校を含む外出行為を実施する世帯構成員の比率が低下しており、テレワーク生起確率が大幅に上昇したことを示している。図9に示したように、日中の電力消費量の推計値は2017年度よりも2022年度の方が各時刻で約1.2倍程度大きく、昼間において外出行為を実施する世帯構成員の比率が低下するように最適化されている。テレワーク生起確率は2017年度ではほとんど変化しなかったのに対して、2022年度では約70%となった。



較正されたパラメータの妥当性について考察する。最適化対象のうち、2017年度と2022年度で大きく変化したテレワークに係るパラメータの妥当性を検討した。テレワークの利用状況を調査する国の研究として、総務省による「国内外における最新の情報通信技術の研究開発及びデジタル活用の動向に関する調査研究」がある。図11より2022年における日本のテレワーク率は約30%である。図12より20代のテレワーク率は40%近い一方、60代のテレワーク率は20%と年代による違いがあるが、本研究で最適化された2022年度におけるテレワーク生起確率は70%と過大である。これはTREESモデルにおけるテレワーク行為に対応した稼働機器をパソコンのみと電力消費の増分を小さく設定したことによる。例えば、テレワークに使用されるパソコンがノート型ではなく、デスクトップ型であると仮定すると、パソコンの電力消費量は約60 [Wh/hour] から約120 [Wh/hour] に2倍増加する。約7割のモデル世帯がノート型を保有していると考えられることから、2022年度におけるテレワーク生起確率は5割程度になると推測される。その他テレワーク行為に対する稼働機器に電気ジャーポットなどを追加するなど、設定条件の改善により

正確な較正が見込まれる。

(2) 家庭部門モデルの精度向上

(2-1) 温室効果ガス削減対策の効果と気象影響の定量化

後述するようにTREESモデルによる全国の家
庭部門エネルギー消費量と総合エネルギー統
計の絶対値には差があるため、ここでは2013年
度の値を基準とした増減に着目して、モデルに
よる推計結果を資源エネルギー庁（以下エネ
庁）及び環境省の増減要因分析（エネ庁：『令
和2年度におけるエネルギー需給実績（確報）』、
環境省：『排出量増減要因分析（2019年確報
値）』）と比較した。図13にエネ庁推計値との
二次エネルギー消費量での比較および環境省・
国立環境研究所温室効果ガスインベントリオ
フィス（以下インベントリオフィス）発表によるCO₂排出量との比較を示す。

本研究で推計された各年の削減量の収支は
エネ庁に対して誤差率17%未満（統計値に不
自然な変動が見られる2017年度を除く）、環
境省との比較で誤差率15%未満（2014年度・
2017年度を除く）となっていることから、毎
年の増減量はモデルで考慮した気象影響と対
策効果で概ね説明できる。本推計の2014年
度値は環境省と整合しないが、インベントリ
オフィスとは整合しており問題ないとする。ま
た、本推計では4.の2-4)の手法により国勢
調査結果から毎年の世帯数変化を推計し、世
帯数変化要因を算出した。エネ庁・環境省に
おいても各年度の世帯数要因と世帯人員要因
の合計値は排出量増加の方向になっており、
本推計の結果は概ね整合している。

図14に2013年度比の二次エネルギー消費削減量推計結果を示す。前述した2017年度と同様、2020年度にも統計値との乖離があるが、これは(1-4)に示した新型コロナウイルスの流行に伴う住宅滞在時間の増加が現段階でTREESモデルに反映されていないことが原因と考えられる。また、気象影響によりエネルギー消費は毎年著しく変動しており、影響の大きい2015年度ではみかけの削減量のおよそ77%が気象条件に起因する。気象条件は暖房需要に最も大きな影響を与え、次いで冷房、給湯のエネルギー消費に影響を与える。

本研究では前述した4項目の対策の効果を推計したが、図14より、機器毎では冷暖房、すなわち住宅の高性能化と高効率エアコンの導入効果が最大で、次いで高効率給湯器の導入と冷蔵庫の性能向上が削減に大きく寄与している。

(2-2) 2030年度に向けた対策進捗評価

図15に2021年度までの家庭部門の取組による省エネルギー効果の推計値と2030年度における政府の削減目標値を示す。「高効率給湯器の導入」、「高効率照明の導入」、「トップランナー制度等による機器の省エネ性能向上（図ではトップランナー制度と表記）」、「新築住宅における省エネ基準適合の推進（図では新築住宅の断熱性能向上と表記）」はシミュレーションによる推計結果で、それ以外の6つの項目については本モデルでは推計が困難であるため、地球温暖化対策計画の進捗状況に記載されてい

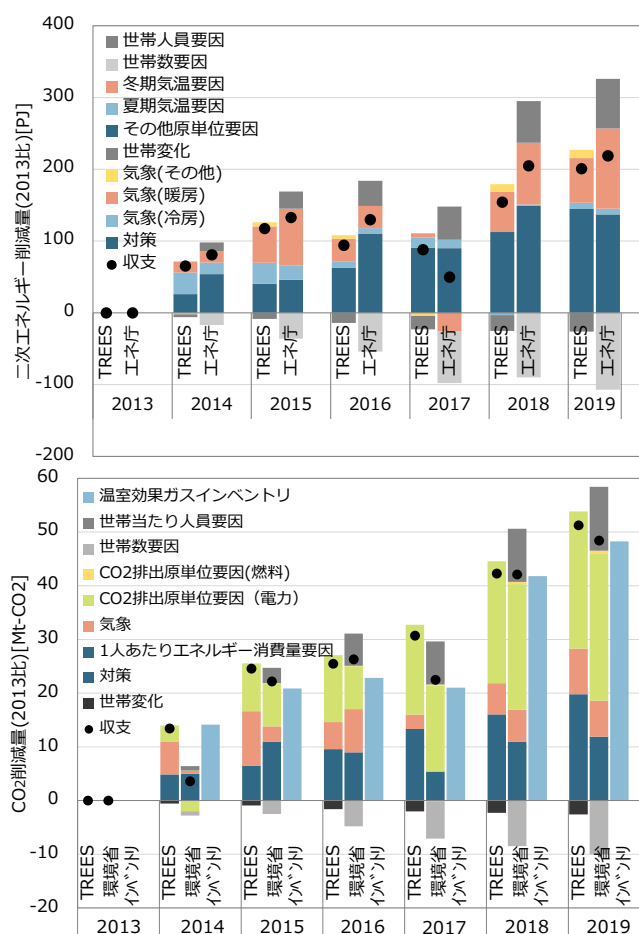


図13-政府の増減要因分析との比較
(上：資源エネルギー庁、下：環境省)

る削減量をそのまま引用した。シミュレーションで推計した4項目は省エネルギー効果全体の90%以上を占めており、それ以外の対策効果は僅かである。また、目標達成の目安として2013年度から2021年度までの削減実績を直線で近似（図中の点線）すると、2021年度時点での二次エネルギー消費削減量は目標値に対して約88%の達成率となる。直線と実績を比較すると、目標に対する達成率は年々増加傾向にあるものの、現状では2030年度目標に達していない。以上から、2030年度目標の達成のためには、対策のさらなる強化・推進を図る必要があることがわかる。

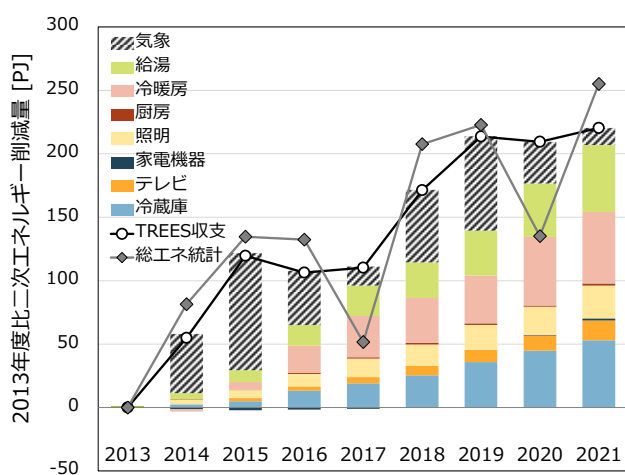


図14-2013年度比二次エネルギー削減量

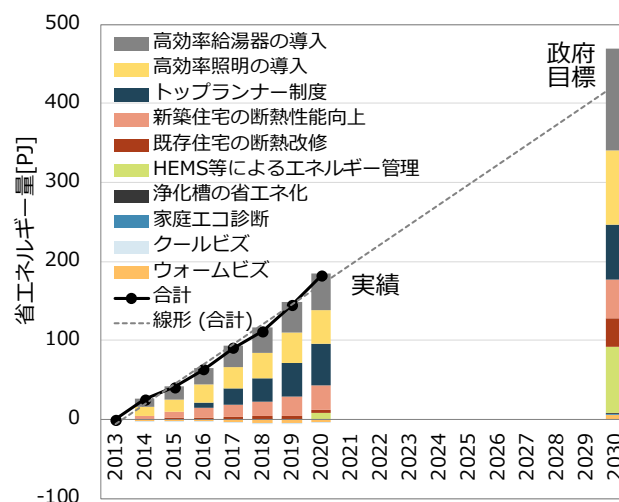


図15-家庭部門の対策進捗と2030年度目標（右端）

（2-3）政府削減対策実施ケースの評価と限界削減費用の計算

地球温暖化対策計画における家庭部門の省エネルギー対策が完全に実施された場合を想定し、TREESモデルを用いて2050年度までの二次エネルギー消費量を推計する。対策の導入方法としては上述した（2-1）、（2-2）の2021年度までの進捗状況に基づき、2021年より対策導入ペースを加速させる。また、2030年度から2050年度まではその導入ペースが維持されるとする。なお、気象データはすべて2021年度のものをを用いる。地球温暖化対策計画に基づいて設定した2030年対策ケースにおける用途別のシミュレーション条件の概要を表8に示す。上記の計算条件による2050年度までの年間二次エネルギー消費量推計結果を図16に示す。政府の削減対策のうち、TREESモデルでは考慮できていないHEMSや浄化槽の省エネ化による削減量を除くと、政府試算の二次エネルギー消費量削減目標は2013年度比で34%減少となっているので、「2013年度比34%減少」を2030年削減目標として定義する。なお、家庭部門における政府の2030年目標は、PV等の発電量を含まず最終エネルギー消費量のみを対象にしている点は注意が必要である。図より2030年対策実施ケースでも政府の2030年削減目標には僅かに届かないことがわかる。また、2050年度におけるTREESモデル推計結果の収支（図中のTREES合計）を見ると、2050年度の家庭部門ゼロエネルギーの達成も困難であることがわかる。これは、灯油用途とガス用途のエネルギー消費量が残存するなど、家庭部門の省エネルギー化が十分に進まないためである。特に、給湯用途と暖房用途で電化を促進することによる削減の余地が大きい。また、冷蔵庫やテレビ、照明用途、厨房用途に関しては、2025年度時点で既に省エネルギー化の進行速度が停滞しており、今後の削減余地は限定的であると考えられる。

なお、これらの追加対策を考える上で、各対策のコストを示すことは重要であるが、TREES

表8-2030年対策実施ケースの設定

対策名	設定内容
住宅の省エネ化（新築・改修）	新築住宅のZEH基準適合率を増加させ、2030年以降は100%（適合義務化） また、ZEH基準適合住宅にはPVを導入する。
高効率給湯器の導入	HP給湯機を1590万台、潜熱回収型給湯器を3050万台、燃料電池を300万台導入。その他は従来型給湯器とする。また、2030年以降はHP給湯器と燃料電池が増加すると想定。
高効率照明の導入	2030年時点におけるLED照明の普及率が100%
家電機器の性能向上	テレビと冷蔵庫は2021年の最高性能機器が2026年以降の平均となるように設定。エアコンは政府目標に基づいて将来APFを設定。

モデルでは世帯特性や地域といった類型毎に対策効果を計算できるため、限界削減費用を類型毎に算出することができる。図17に対策のコストを（対策技術導入費用－既存技術導入費用）とした場合の限界削減費用とCO2削減量の関係を示す。照明、給湯、住宅断熱の各対策において効果が世帯人員により大きく変化し、低いコストで高い効果を得るためには世帯類型別に対策をとることが有効であることがわかる。

（2-4）追加対策の提案とその効果の予測

（2-3）の結果を踏まえ、2030年・2050年削減目標の達成に向けた追加的対策を提案し、その削減効果を評価する。（2-3）では、現状の対策では2030年削減目標を達成することや、2050年に家庭部門でゼロエネルギー化を達成することが困難なことが示唆された。そこで、（2-3）の2030年対策ケースを基準として4つの追加対策シナリオを提案し、2050年度までの省エネルギー効果を推計することで、目標の達成にどのような追加対策が効果的かを明らかにする。各シナリオの概要を表9に示す。

なお、一般的なヒートポンプ給湯機（以下、HP給湯機とする）の稼働は深夜時間帯に貯湯する深夜運転モードであるが、近年は昼間運転モードが推奨されている。HP給湯機は外気温が高いほどCOPが高くなることに加え、家庭内で太陽電池による発電量を自家消費することが推奨されていることから、ここでは昼間運転モードで稼働した場合を計算する。

TREESモデルにより推計したシナリオ別の2050年度までの年間二次エネルギー消費量を図18に示す。シナリオ(A)、(B)では表9で示したそれぞれのシナリオにおける削減対策を実施した結果、シナリオ(C)では電化促進に加え各戸の太陽光発電を1kW増加させた結果を示している。混合シナリオでは、(A)から(C)の削減対策をすべて実施した結果を示している。また、図中の赤線は2030年削減目標の2013年度比約34%削減の目標ラインを示しており、青線は50%削減の目標ラインを示している。

表9-2050年までの追加的対策の概要

シナリオ名	対策名		対策内容		
(A) 省エネルギー行動促進シナリオ	Step 1	省エネルギー行動実施	・冷暖房設定温度の変更 (クールビズ、ウォームビズ)		
			・家電機器の使用制限		
(B) 技術革新シナリオ	Step 1	機器性能の向上	・エアコンの性能向上		
			・ヒートポンプ給湯機の性能向上		
			・テレビの性能向上		
			・冷蔵庫の性能向上		
	Step 2	保有台数の削減	・テレビの台数制限		
			・冷蔵庫の台数制限		
(C) 太陽光発電依存型電化シナリオ	Step 1	住宅設備の電化	・ZEH基準への住宅断熱改修に伴って 給湯・暖房設備の電化を促進		
			Step 2	PV導入促進	・南向き太陽電池の発電容量を1kW増加
					・南向き太陽電池の発電容量を2kW増加
混合シナリオ	－		・シナリオ(A)～(C)のすべての対策を実施		

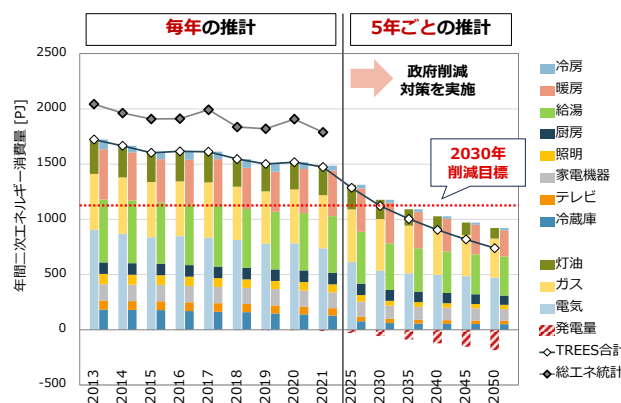


図16-2050年までの二次エネルギー消費量推計結果

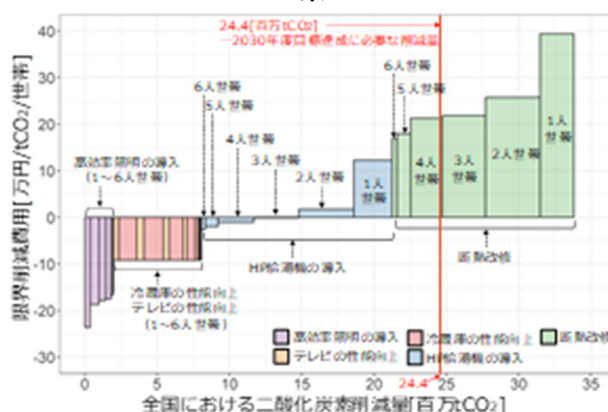


図17-世帯類型別限界削減費用とCO₂排出削減量の関係

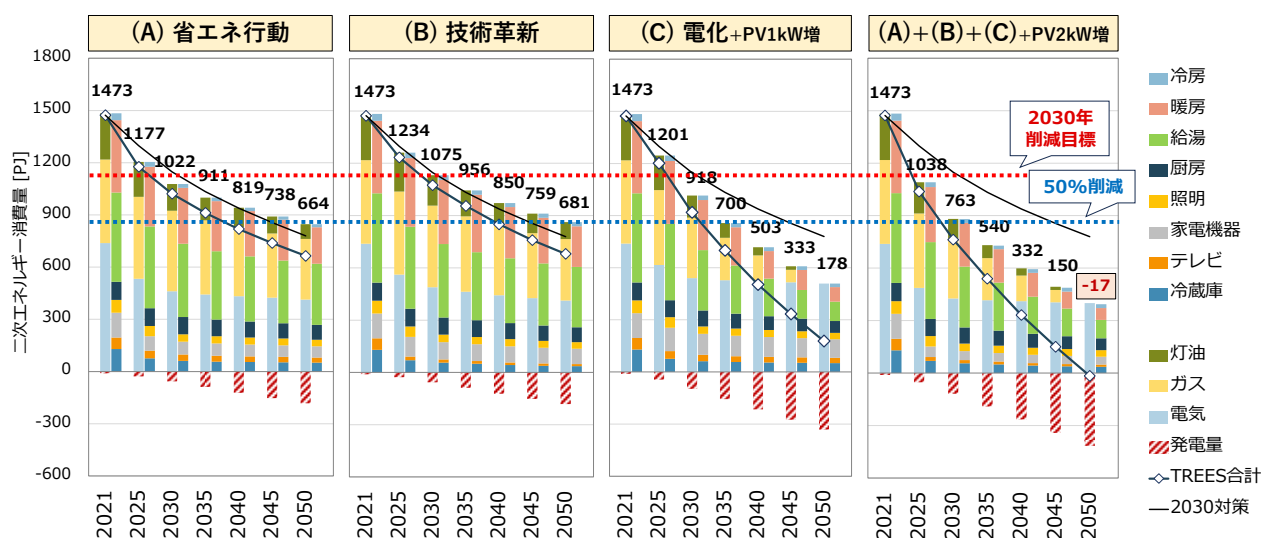


図 18-2050 年までのシナリオ別の二次エネルギー消費量推計結果

図 18 より、すべてのシナリオにおいて 2030 年削減目標を達成できることがわかった。また、室内設定温度の変更や温水便座などの家電機器の使用制限などの行動変容を想定したシナリオ(A)と機器の性能向上やデジタル化に伴う機能集約化による機器台数の減少を想定したシナリオ(B)では、2040 年度以降で 2013 年度比 50%以上の二次エネルギー消費量の削減が可能であるが、いずれのケースもエネルギー消費削減は大きく進まず、2050 年目標の達成は極めて困難である。一方で、住宅設備の電化と太陽電池の設置台数増加を想定したシナリオ(C)では、2035 年度以降で 2013 年度比 50%以上の削減が可能で、2050 年度のゼロエネルギー化達成には及ばないが、他シナリオより大きなエネルギー消費削減が進むことがわかる。また、すべての追加的対策を実施する混合シナリオでは、急速にエネルギー消費の削減が進むことに加えて、PV 発電量も大きく増加することから、2030 年度時点で 2013 年度比 50%以上の削減、2050 年度において家庭部門のゼロエネルギー化を達成できることがわかる。

(2-4) スマートメータデータを用いた逆問題解析、および寒冷地暖房考慮・世帯数による補正結果

スマートメータデータを用いた逆問題解析結果による行動など入力データの補正、および寒冷地暖房の考慮・世帯数補正による 2013 年度エネルギー消費量推計値の変化と 2013 年度の総合エネルギー統計との比較結果を図 19 に示す。

スマートメータデータを用いた行動・冷房の最適化により、2013 年度における二次エネルギー消費量の推計値が 3.5%増加した。これは深夜に活動する居住者の割合が多くなったことが要因である。ただし冷房は減少しており、補正によって冷房の使用頻度が低下したことが要因である。

行動・冷房最適化結果に加えて世帯数補正と寒冷地暖房の考慮をおこなった。4.の 2-4 で示した毎年の世帯数補正に加え、北海道の 30%の世帯に対してセントラル暖房システムの存在を考慮したことにより灯油消費量が 24PJ 増加し、当初約 2 割あった誤差が 1 割強に減少した。

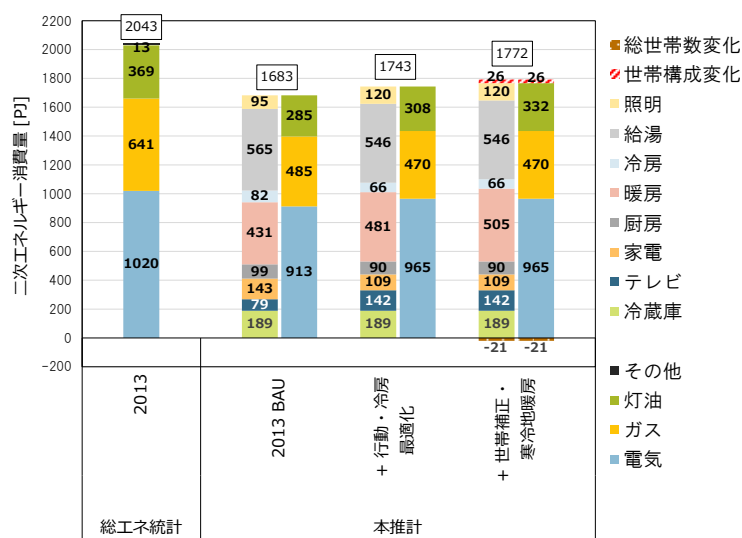


図 19-スマートメータ最適化結果および寒冷地暖房・世帯補正による 2013 年度エネルギー消費量推計結果

(3) 業務部門モデルの精度向上

(3-1) 経年変化の推計結果と精度評価

表3に示した分類を用いた施設用途区分のモデルによるエネルギー消費量と総合エネルギー統計との比較を図20に示す。図は9用途の二次エネルギー消費量内訳を示す。業務部門のCO₂排出量の推計値は2013年で174 Mt-CO₂であり、開発モデルはその他部門を除く排出量206Mt-CO₂の84%をカバーできている。ただし、電力消費が良い一致を示しているのに対し、燃料消費は全体として大幅に過小推計となった。モデルではコジェネレーション設備、医療施設の消毒や洗濯・洗浄等の設備、さらに、サービス生産用のエネルギー消費を考慮していないことが主要因として考えられるが、緩和策として政府が想定している業務施設のエネルギー効率向上対策が対象としているエネルギー消費についてはモデルで精度良く再現されていると考えられる。

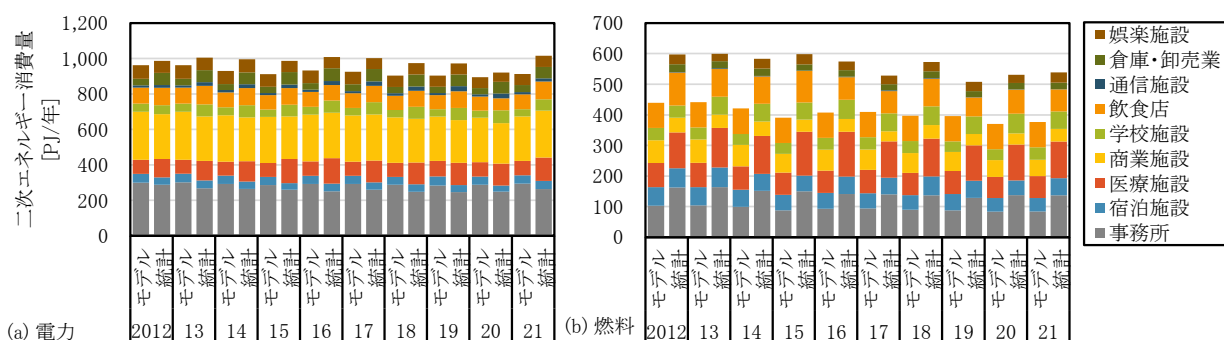


図20-業務部門の二次エネルギー消費とその内訳

計算対象とした業務施設用途についての2013年度から2021年度までの年間二次エネルギー消費量の変化を図21に示す。図では二次エネルギー消費量の変化を延床面積増加による増加（負の領域の床面積）と、エネルギー効率改善による削減（電力及び燃料）、2013年度との気象の差異（気象）要因に区分している。コロナ禍にあった2020年度と2021年度、エネルギー価格の高騰があった2015年度を除くと、モデルの結果はおおむね総合エネルギー消費統計（統計）の挙動と一致している。エネルギー効率向上による削減効果を正確に再現しているか確認するため、トップダウンモデルによる要因分解法を用いて、総合エネルギー消費統計の電力・燃料消費の変化量を床面積増減、経済活動変化、エネルギー効率変化、気象条件の4成分に分解し、エネルギー効率向上による年平均削減増加量を定量化した。表10に示すように、モデルによる推計結果はコロナ禍の期間を除いた総合エネルギー統計の年平均値の95%信頼区間の範囲に入っており、モデルによる推計値がエネルギー消費変化をある程度正確に再現していることを確認した。なお、気象の影響は家庭部門に比べると小さいが、床面積増の影響が大きいことは注意が必要である。

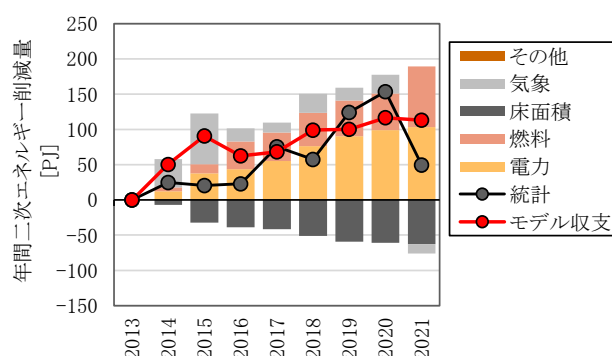


図21-業務部門のエネルギー消費、CO2排出量推計結果と実態値の比較

表10-エネルギー効率向上によりもたらされる年平均削減増加量

	電力[PJ/年]	燃料[PJ/年]
総合エネルギー統計(2013年～2021年)	-4.0 ± 11.0	2.2 ± 11.1
総合エネルギー統計(2013年～2019年)	9.5 ± 5.7	16.4 ± 8.7
本研究開発モデル(2013年～2021年)	12.4 ± 0.8	10.8 ± 1.7

(3-2) 2013年度からのエネルギー消費量変化の推計

地球温暖化対策計画の進捗評価において推計されている対策別二次エネルギー消費削減量を図22に示す。2013年度から2021年度は棒グラフで対策別の削減量を表しており、線グラフで政府進捗評価によ

る対策導入効果合計値を示す。なお、モデル内で考慮できていない対策（エネルギー管理等3つの対策）については、政府による推計値をモデルの推計値に加算している。また、政府推計では考慮されていない床面積増加によるエネルギー消費の増加影響について図中に負の領域で示している。2030年度では、モデルの推計値に加えて、地球温暖化対策計画の補足資料に記載されている対策項目別削減量を積み上げグラフにより示している（図中の「政府想定」）。この結果から得られた知見は次のとおりである。

- 2030年の推計では、モデルによる削減量の推計結果は、政府による推計よりも約60PJ/年小さいと推計された。延床面積の増加によるエネルギー消費の増加は約90PJ/年であり、この結果、約150PJ/年、政府推計よりも削減量は不足になると推計された。
- 2021年度までの進捗評価を見ると、モデルの推計結果は政府による進捗評価結果とおおむね一致した。この結果は政府の推計方法がある程度妥当なものであることを示している。
- 2030年度において特に差異が大きいと推計されたのは建築物の省エネルギー化（26PJ/年）、高効率給湯機の導入（18PJ/年）、機器のエネルギー消費の向上（34PJ/年）である。建築物の省エネルギー化について、モデルでは2010年以降の技術採用傾向の継続を想定したが、それでは2030年目標の達成が困難であり、さらなるエネルギー性能向上が必要であることが明らかとなった。なお、モデルの推計では空調・給湯関連設備の採用について2010年以降の技術採用傾向の延長を考慮し、建築物省エネ法の改正による省エネ基準の引き上げの効果は含まれていない。高効率給湯機の導入については、ヒートポンプ給湯機の普及によってもたらされる削減に大きな差異が生じた。モデルでは空調設備と同様に竣工設備データによって設備採用確率を表す回帰モデルを作成してストック推計に用いた。対象ストックの竣工設備データサンプルにヒートポンプ給湯機を設置したものが少なかったことに起因する。また、今回考慮できなかった施設用途（温泉施設等）にヒートポンプ給湯機が導入され、推計から漏れてしまった可能性もある。機器についてはコンセント機器の効率が40%改善することを想定したが、推計結果よりも小さい推計結果となった。
- 政府推計において対策項目別の推計結果に誤差が生じる要因が確認された。政府推計では、照明一台当たりの稼働時間を3000時間と想定しているが、多くの業務施設では3000時間以上の稼働があり、一台当たりの削減量は政府推計の想定よりも大きいと推計された。一方で、2021年度までは進捗評価による削減効果推計結果はモデルの推計結果よりも大きく、普及速度が過大に見積もられている可能性がある。建築物の省エネルギーにおいて最も大きな効果をもたらしている要素は熱源機器の効率向上と熱源システム構成の変化（個別熱源方式の普及や緩やかな電化傾向）であった。省エネルギー手法の普及や断熱性能向上によりもたらされている効果はある程度限定的であると推計された。

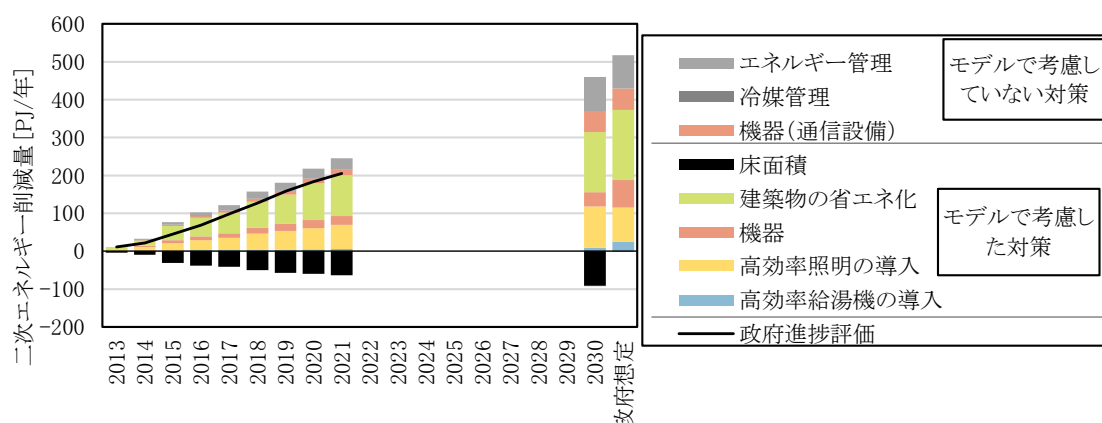


図22-地球温暖化対策計画業務部門進捗評価の比較

(3-3) 2030年度に向けた削減可能性評価と追加対策の検討

前節で推計されたエネルギー消費の変化によってもたらされるCO₂排出量の変化を推計した。結果を図23に示す。左図では2013年度からの追加的な変化を項目別に示している。本研究の対象ストックに加えて、業務その他部門に含まれるその他のエネルギー消費と、対象ストックの過小推計分に伴うCO₂排出量

を凡例「その他」で示しており、これらは2030年度までエネルギー消費量が変化しないと想定した。この結果、2030年度のCO₂排出量は133MtCO₂/年と推計され、17MtCO₂/年が2030年度目標に対して不足と推計された。ただし、政府推計ではモデルで考慮できなかった対策において11.6MtCO₂/年の削減があると推計されており、これを加えると不足は6MtCO₂/年と推計された。右図では、追加的な対策についての検討結果を示す。図中左から、全空調熱源機器をトップランナー水準のものに置き換える対策、空調・給湯熱源を電化する対策、空調搬送系統関連省エネルギー手法の普及（換気の全熱交換器、変風量方式採用など）、壁体・窓の断熱強化、これら全手法の組み合わせであり、全手法で13MtCO₂/年の削減ポテンシャルがあることがわかった。一方で、断熱強化策は普及に時間を要するなどの特性があり、特に熱源効率向上、熱源電化が追加対策として有効であると考えられる。

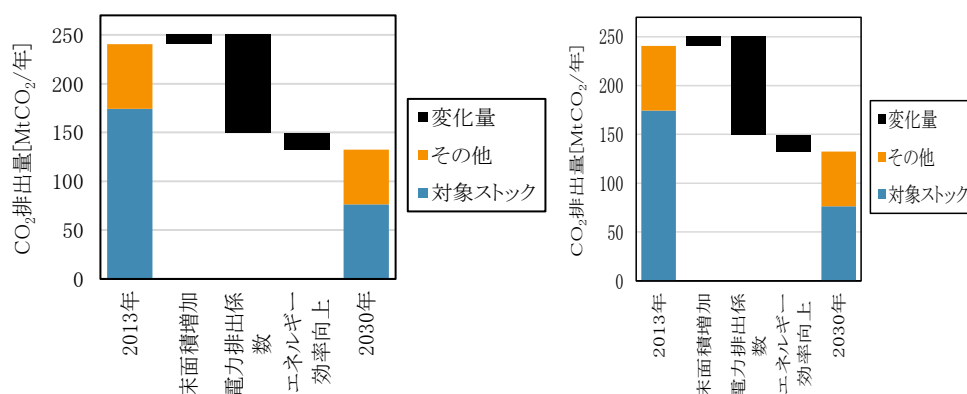


図23-業務部門のエネルギー消費の将来推計結果

(4) アンケートデータによる分析

電力・ガス取引監視等委員会による「電力取引報結果」によると、関西電力管内における2024年1月時点での低圧分野の新電力シェアは販売電力量ベースで27.6%である。同供給区域内で実施した本アンケートでは、新電力の契約世帯数ベースでのシェアは33.5%で、うち大阪ガスが18.4%であった。図24には調査対象自治体の契約電力会社のシェアを示している。この結果より、おおまかな傾向は類似しているものの、淡路島のみ大阪ガスの供給区域外であることからシェアが異なっていることがわかる。また図25に世帯年収別の契約電力会社のシェアを示す。1,500万円以上のサンプル数が全回答件数の2.1%であり、結果の信頼性が低いことを考慮すると、世帯年収が高いほど関西電力から新電力に契約を切り替えている状況が読み取れる。世帯年収と電力消費量に一定の相関関係があると仮定するならば、各自治体が対策の進捗状況を把握するうえで有用な情報であるといえる。図26には対象自治体ごとの給湯設備のシェアを示す。こちらも同様に大阪ガスの供給範囲外である淡路島においてガス給湯器のシェアが小さく、それに応じて電気ヒートポンプ式給湯器や灯油給湯器の割合が大きくなっていることがわかる。また生駒市は他の大阪ガス供給区域内の自治体に比べて電気ヒートポンプ式給湯器の割合が高

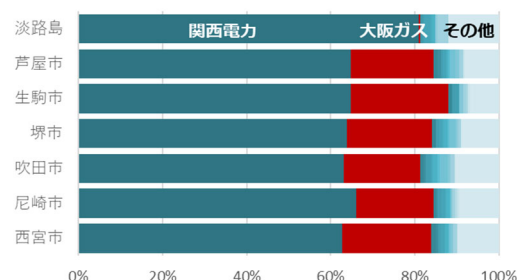


図24-対象自治体の契約電力会社のシェア

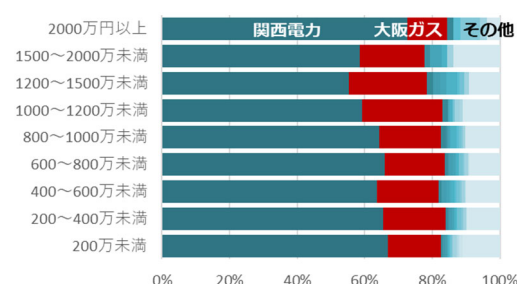


図25-世帯年収別の契約電力会社のシェア

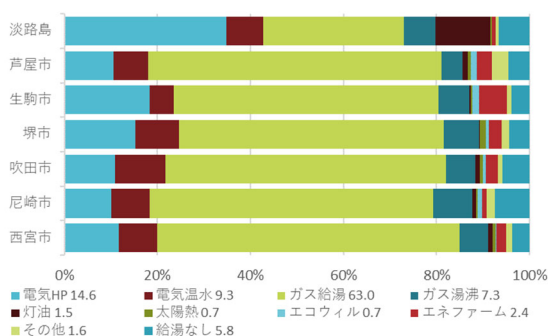


図26-対象自治体の給湯設備のシェア

く、別の調査項目において太陽光発電設備の設置件数が多いことも確かめられている。このことから、地域特性における明確な差異の少ない自治体間においても、保有設備ストックに関する考慮すべき特徴が存在する可能性が示された。このような情報は家庭CO₂統計においても一定程度取得されているが、そのサンプル数は全国の約5,000万世帯に対し毎年1万世帯程度である。一方、今回のWEBアンケート調査では特定の自治体に対して人口10万人あたり概ね300サンプル程度を取得することが可能であった。エネルギー需要予測及び脱炭素の進捗評価を実施するにあたり、このような粒度でのデータ取得は地域特性の再現において重要であると考えられる。

(5) 地域のエネルギー・カーボンマネジメントへの応用

これまでの報告では、国を対象としてエネルギー・カーボンマネジメントをおこなう事例について分析・シミュレーションの結果を示してきた。これらの手法の自治体への適用について以下で考察する。まず、基礎自治体単位では「総合エネルギー統計」のような精度の高い統計が存在せず、地域全体のCO₂排出量を評価する上では電力会社別の電力消費割合が必要となるがその統計も存在しない。

本研究で示したスマートメータによる居住者行動などのデータ、(4)で示したアンケートデータは、自治体の特性に応じたシミュレーションを行うための入力条件を備える上で有力な手段となっている。例えばPVや給湯器の選択は本研究で明らかとなったように脱炭素に有効な電化の進展の鍵となるが、アンケートに見るように自治体で大きな差が生じている。このようにアンケート・スマートメータデータ・シミュレーションモデルの3者を組み合わせる図1のデジタルツインモデルの開発は、近年利用可能となった自治体単位の受電データ公開やスマートメータデータの公開と相まって、自治体の温室効果ガス排出削減の有効なツールとなり得ると考えられる。

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

<全体の達成状況>・・・・・・・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「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」

全体目標	全体の達成状況
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。	家庭部門モデル、業務部門モデルともに、カーボンマネジメントシステムとして求められる精度および各種温室効果ガス削減対策が反映できる機能を備えることができたと考えている。家庭部門、業務部門とも、マネジメントのPDCAサイクルにおいて、本研究以前より実施していたPlan(温暖化対策計画による2030年温室効果ガス削減量の達成可能性検証)に加え、Check(毎年の気象条件の影響などを考慮した、対策の効果の定量化と2030年削減対策達成の見通しの提示)、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を実証し、本研究で開発したツールで2030年までの温室効果ガス排出削減目標の達成可能性を評価することができた。両部門とも若干の遅れが見られ、追加対策の検討結果も示している。 更に、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に関わる行動(睡眠、テレビ視聴、冷房使用)等の実態を明らかにするだけでなく、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ことは本研究の大きな成果である。また

	独自のアンケート調査を実施し、自治体でこのシステムを実際に運用していく中で、どのようなデータを収集すべきかについても提言することができた。
< 【サブテーマ1】 達成状況 >	1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「全体目標と同様」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
全体目標と同様	全体目標と同様

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

※この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	5
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	1
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	3
口頭発表（学会等・査読なし）：	3 0
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	0
マスコミ等への公表・報道等：	0
研究成果による受賞：	3
その他の成果発表：	0

(2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Y. Shimoda, M. Fujiwara, T. Nakanishi, Y. Yamaguchi, H. Uchida (2022) Energy and carbon management system for a city and a nation. ECEEE 2022 Summer Study Proceedings
2	井上智弘, 黒沢厚志, 加藤悦史, 荻本和彦, 岩船由美子, 山口容平, 内田英明, 太田豊, 下田吉之, ソフトリンクによる2050年のエネルギー需給分析：（1）民生需要変化を考慮したシナリオとその評価, エネルギー・資源学会論文誌 2023年 44巻 5号 p. 234-244, https://doi.org/10.24778/ijser.44.5_234
3	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://doi.org/10.24778/ijser.44.6_274
4	H. Uchida, K. Kishimoto, K. Nishizawa, S. Yoshiyuki, Y. Yamaguchi, K. Togawa (2023) Aggregated Smart Mater 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 ,
5	Y. Yamaguchi, T. Nishijima, X. Zhang, R. Shinohara, Y. Hahashi, H. Uchida, Y. Shimoda (2024) Building stock energy modeling to assess annual progress in stock energy efficiency and carbon emission reduction of commercial building. Applied Energy (submitted)

<査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）>

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
6	下田吉之，2030年度46%削減は達成できるのか？，省エネルギー（一般財団法人省エネルギーセンター），2024年3月，Vol. 76/No. 3

（3） 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
7	K. Nishizawa, K. Kishimoto, H. Uchida, Y. Shimoda, Y. Yamaguchi (2023) Analyzing and modeling occupant behavior by inverse problems with smart meter data. The 18th IBPSA International Conference and Exhibition Building Simulation 2023.
8	T. Nishijima, X. Zhang, A. Otsuka, Y. Yamaguchi, Y. Shimoda (2023) Development of a building stock energy model for commercial building stock considering heterogeneity and yearly change in building stock. The 18th IBPSA International Conference and Exhibition Building Simulation 2023.
9	T. Nakanishi, M. Fujiwara, Y. Shimoda (2023) Development of an evaluation system for Japanese Global Warming Countermeasures Plan in the residential sector. The 18th IBPSA International Conference and Exhibition Building Simulation 2023.

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
10	藤原みさき，中西利樹，下田吉之，家庭部門のエネルギー需要削減に向けた対策とその効果の定量化第，38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2021）
11	鳴川公彬，山口容平，西島拓海，下田吉之，ストックの経年変化を考慮した業務部門地球温暖化対策計画評価，第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2022）
12	山口容平，西本隆哉，藤原みさき，鳴川公彬，山下皓太郎，西島拓海，大塚敦，榎原史哉，内田英明，下田吉之，荻本和彦，岩船由美子，井上智弘，黒沢厚志，加藤悦史，ソフトリンクによる2050年のエネルギー需給分析 その2（1）民生部門エネルギー需要，第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2022）
13	岸本一将，西澤一輝，内田英明，スマートメータデータによるエネルギー最終需要推計モデルパラメータのベイズ最適化，第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2022）

1 4	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2020年度までの進捗評価，第41回エネルギー・資源学会研究発表会（2022）
1 5	西島拓海，山口容平，大塚敦，下田吉之，ボトムアップモデルを用いた業務部門地球温暖化対策の進捗評価，第41回エネルギー・資源学会研究発表会（2022）
1 6	岸本一将，西澤一輝，内田英明，住宅用スマートメータデータによる空調電力需要推計モデルの逆問題最適化，第41回エネルギー・資源学会研究発表会（2022）
1 7	中西利樹，藤原みさき，下田吉之，家庭部門温室効果ガス削減に向けた政府計画の評価システム構築に関する研究，2022年度日本建築学会大会（2022）
1 8	西澤一輝，岸本一将，内田英明，スマートメータデータを用いた逆問題解析による住民行動分析とモデリング，電気学会 電力・エネルギー部門大会（2022）
1 9	藤原みさき，下田吉之，中西利樹，家庭部門における省エネルギー対策の2020年度までの進捗評価，第41回エネルギー・資源学会研究発表会（2022）
2 0	岸本一将，西澤一輝，内田英明，下田吉之，山口容平，宮本誠文，住宅用スマートメータデータによる空調電力需要推計モデルの逆問題最適化，第41回エネルギー・資源学会研究発表会（2022）
2 1	西島拓海，大塚敦，山口容平，下田吉之，ボトムアップモデルを用いた業務部門地球温暖化対策計画の進捗評価，第41回エネルギー・資源学会研究発表会（2022）
2 2	山口容平，藤原みさき，中西利樹，西島拓海，大塚敦，榎原史哉，内田英明，下田吉之，荻本和彦，岩船由美子，井上智弘，黒沢厚志，加藤悦史，ソフトリンクによる2050年のエネルギー需給分析その3（1）脱炭素化推進に伴う民生部門エネルギー需要の変化，第41回エネルギー・資源学会研究発表会（2022）
2 3	西澤一輝，岸本一将，内田英明，下田吉之，山口容平宮本誠文，スマートメータデータを用いた逆問題解析による住民行動分析とモデリング，令和4年電力・エネルギー部門大会（2022）
2 4	大塚敦，西島拓海，山口容平，内田英明，下田吉之，ボトムアップモデルを用いた業務部門地球温暖化対策計画の進捗評価，第39回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2023）
2 5	西澤一輝，岸本一将，内田英明，下田吉之，山口容平，十川和也，逆問題解析によるボトムアップ型エネルギー需要推計モデルの較正，情報処理学会第85回全国大会（2023）
2 6	Xukang Zhang, Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda, Greenhouse gas emission policy assessment: Insights from Japan's commercial buildings with building stock energy model, 空気調和・衛生工学会近畿支部設立60周年記念国際交流イベント（2023）
2 7	中西利樹，石原沙莉，下田吉之，家庭部門における温室効果ガス削減目標に向けた省エネルギーシナリオに関する分析，第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2024）
2 8	西島拓海，山口容平，張煦康，篠原里穂子，林優羽，内田英明，下田吉之，ボトムアップモデルを用いた業務部門2030年二酸化炭素排出量削減目標達成可能性の評価，第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2024）
2 9	西澤一輝，内田英明，下田吉之，山口容平，十川和也，高精細なスマートメータデータを活用した逆問題解析による住民行動の全自動モデリング，第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス（2024）

(4) 知的財産権

成果番号	発明者	出願者	名称	出願以降の番号	出願年月日
	特に記載すべき事項はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ 1】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ 1】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ 1】の研究成果による受賞
30	第 41 回エネルギー・資源学会研究発表会学生発表賞（2023），藤原みさき
31	電気学会 令和 4 年 電力・エネルギー部門大会 YOC 奨励賞（2022），西澤一輝
32	情報処理学会第 85 回全国大会学生奨励賞（2023），西澤一輝

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ 1】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない

Abstract

[Research Title]

Development of National and Local Governments' Carbon Management System for Building Sector

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Shimoda Yoshiyuki
(PI ORCID) :	https://orcid.org/0000-0002-4487-0089
Principal Institution :	OSAKA UNIVERSITY1-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871 Japan Tel: +816-6879-7664 Fax: +816-6879-7664 E-mail: shimoda@see.ang.osaka-u.ac.jp
Cooperated by :	None
Keywords :	Carbon management, Consumer sector, Bottom-up simulation, Statistical data, Smart meter data

[Abstract]

Japan is implementing measures to reduce greenhouse gas emissions in 2030 by 46% compared with 2013 levels. Although progress management is conducted annually, the lack of a detailed factor analysis means that it is unclear whether progress is on track. Our research group is developing a system to estimate emission reductions and we have made specific proposals that should enable national and local governments to more effectively manage carbon emissions in the residential and commercial sectors.

For the residential sector, we conducted estimations using total residential end-use energy simulation (TREES) and compared these to the latest statistical emissions data. When the impact of weather was eliminated, it became evident that the improvement in housing performance and the introduction of high-efficiency air conditioners significantly contributed to these reductions. However, since fiscal year 2021, the reduction target for secondary energy consumption has not been met. Further enhancement and promotion of the measures are necessary to achieve the 2030 target. The efficiency of the current measures was evaluated by analyzing the relationship between marginal abatement costs and CO₂ reduction. We also proposed four additional scenarios and estimated their energy-saving effects up to 2050. Supplementary measures that could effectively help achieve the targets were also identified.

For commercial building stocks, this study developed a building stock energy modeling framework that integrates top-down building stock decomposition, including building systems and energy conservation measures, and bottom-up physics-based energy demand quantification using reference building models that represent building stock segments. The developed model effectively captured the contributions made by these technologies and their short-term dynamics. Although there were significant errors in estimating some building subsectors and end uses, the model predicted changes in the aggregated energy

consumption with acceptable accuracy. The Japanese 2030 emission reduction target cannot be achieved with the current technology deployment trends; however, this shortfall can be addressed by applying additional measures.

At the basic municipality level, there are no high-precision statistics, such as comprehensive energy statistics, that can be used by the national government. However, survey data on smart meters and regional electricity contracts are powerful tools that provide input conditions tailored to the characteristics of each municipality. The digital twin model, which combines these data with the simulation model developed in this project, is an effective tool that could be used by municipalities to efficiently manage and reduce greenhouse gas emissions.

[References]

- Y. Shimoda, M. Fujiwara, T. Nakanishi, Y. Yamaguchi, H. Uchida (2022) Energy and carbon management system for a city and a nation. ECEEE 2022 Summer Study Proceedings
- H. Uchida, K. Kishimoto, K. Nishizawa, S. Yoshiyuki, Y. Yamaguchi, K. Togawa (2023) 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>,
- Y. Yamaguchi, T. Nishijima, X. Zhang, R. Shinohara, Y. Hahashi, H. Uchida, Y. Shimoda (2024) Building stock energy modeling to assess annual progress in stock energy efficiency and carbon emission reduction of commercial building. Applied Energy (submitted)
- K. Nishizawa, K. Kishimoto, H. Uchida, Y. Shimoda, Y. Yamaguchi (2023) Analyzing and modeling occupant behavior by inverse problems with smart meter data. The 18th IBPSA International Conference and Exhibition Building Simulation 2023.
- T. Nishijima, X. Zhang, A. Otsuka, Y. Yamaguchi, Y. Shimoda (2023) Development of a building stock energy model for commercial building stock considering heterogeneity and yearly change in building stock. The 18th IBPSA International Conference and Exhibition Building Simulation 2023.
- T. Nakanishi, M. Fujiwara, Y. Shimoda (2023) Development of an evaluation system for Japanese Global Warming Countermeasures Plan in the residential sector. The 18th IBPSA International Conference and Exhibition Building Simulation 2023.

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

別添

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

中間評価結果時のコメントに対する対応状況を以下に記載します。

指摘等	対応状況・非対応理由等
1. 家庭部門、業務部門の脱炭素化推進のために政策に反映し得る詳細な研究と期待している。住宅・建築物の新築時、改修時の脱炭素化投資額の提示に将来的につながる研究に深めていただけるとさらに良いと思う	図17に示したように、家庭部門において各対策の限界削減費用を世帯類型別に示すことに成功し、より精緻でコスト効率の高い対策立案の手法を示すことができた。
2. スマメ分析やTREES モデルによる家庭部門の解析で、給湯器・暖房機器の電化促進が効果的であることを明確に指摘し、住民の身近な行動で改善できることを示したことを評価したい。業務部門での進捗状況評価について、過大な推計があることからその原因解明に取り組むことを期待する。大阪府のみならず他の地方自治体による民生部門カーボンマネジメントへの貢献も期待したい。	「5-1. 成果の概要」において、「(3-1) 経年変化の推計結果と精度評価」および「(3-2) 2013年度からのエネルギー消費量変化の推計」で記載の通り、最新年度の統計データとの整合性に関する分析を実施している。本課題で開発したツールの過大推計については、照明稼働時間の政府の過小想定などを検討しており、精度向上に向けた取り組みを継続していきたい。
3. 年々実施された対策の効果をモデルを用いて確認できる仕組みができ上がっており、結果を確認しながら不足分の追加対策をどうすればよいかを検討できる体制、すなわち PDCA を着実に回せる体制ができているように感じる。日本全体の評価だけでなく各自治体でカーボンマネジメントがしっかりできるように、さらにモデルによる評価の改善を進めていただきたいと思う。	本課題で開発したツールにより日本全体における評価は既に可能となっている。一方、各自治体でカーボンマネジメント実現するには、その自治体特有のパラメータを統計調査によって明らかにしなければならないため、その指針となるアンケート調査方法や調査項目について検討した。
4. 「地球温暖化対策計画や地方公共団体実行計画（区域施策編）に基づく毎年の民生部門からの CO ₂ 排出削減量を、従来のエネルギー統計に加え、①研究チームで開発した、居住者行動や気象データ、建築の性能等に基づき機器毎の稼働を模擬し、気象の差異や地域内の建築・世帯のエネルギー消費特性の分布を再現できるボトムアップ型エネルギー最終需要シミュレーション、②環境省の家庭 CO ₂ 統計等アンケート調査、③大量のスマートメータデータの 3 つのツールから構築したサイバーフィジカルシステムを用いて分析」とあるが、この部分マクロの一つ一つが非常に緻密で詳細な数字に裏付けられて積み上げられており、総合的	「5-1. 成果の概要」において、家庭部門「(2-2) 2030年度に向けた対策進捗評価」、業務部門「(3-2) 2013年度からのエネルギー消費量変化の推計」で記載の通り、最新年度の統計データとの整合性をとりつつ、信頼性の高い2030年度の将来予測結果を提供している。

に精度確度高くマクロに対策の進捗状況を把握し信頼性を担保している。将来予測にもぜひ役立ててほしい。	
5. スライド 16 について、過大推計／過小推計の理由について定性的説明は可能だろうか。	項目2と同様。
6. 民生部門のエネルギー消費量等の把握・分析、モデル化等により、国および地方自治体の温暖化政策（緩和策）への貢献が期待できる研究知見が得られており、評価できる。	指摘事項ではないため対応不要。
7. 民生部門のエネルギー消費に関わるボトムアップ型のシミュレーションモデルの構築が順調に進んでいると思われる。すでにシナリオ作成もできており、環境省・エネ庁の実績データとの比較が行われ、モデルの乖離理由の解析も行われているために、政策提言に役立つ成果が得られると期待できる。さらに、ここまで詳細な要素技術の取り込みが行われると、消費者の消費行動の変化予測にも役立つようになるので、AIM モデルとの連携等を考えると波及効果があると思われる。一方で、現モデルでは実績値から乖離も見られ、その原因が気象が平年値からずれたこと等に帰着されているが、それでは将来予測には限界があると思われるので、パラメータ調整にも第一原理を持ち込む努力をしてもらいたい。ひとつのチームでは課題が大きすぎるので、研究連携を拡大できると良い。	本課題において十分な精度の評価モデルを開発できているため、今後はマクロなモデルとの連携についても検討を進めていきたい。実績値との乖離については、気象影響だけでなく、家庭部門においてはコロナ禍の行動変容、業務部門においては照明稼働時間の政府の過小想定などを検討しており、将来予測の精度向上に向けた取り組みを継続していきたい。
8. 計画よりやや前倒しで進捗していると思われる。残された研究期間で、各対策の費用対効果を含めてより精緻な分析が行われることを期待する。また、2030 年度の政府目標に、コロナ後のテレワーク定着による省エネの効果を織り込むために、本モデルを使うことも有効ではないか。	費用対効果については項目1と同様。
9. ボトムアップの精緻なモデル開発が行われており、スマートメータデータによる調整、地域別評価機能の付加など、しっかりとした成果が出されている。さらに、二次エネルギー削減量の統計データとの整合性の解釈が進むことや具体的なマネジメントシステムの提案を期待したい。	「5－1. 成果の概要」において、家庭部門「(2-1) 温室効果ガス削減対策の効果と気象影響の定量化」および「(2-2) 2030年度に向けた対策進捗評価」、業務部門「(3-1) 経年変化の推計結果と精度評価」および「(3-2) 2013年度からのエネルギー消費量変化の推計」で記載の通り、最新年度の統計データとの整合性に関する分析を実施している。
10. 本研究の成果として、すでに民生部門の排出削減目標の達成状況、達成可能性を評価するツールとしての有用性が示されており、環境政策への	「5－3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献」に記載の通り、環境政策への貢献が既に始まっており、今後も継続していきたい。

実際のな貢献が期待される。成果を生かし、消費行動や企業活動の脱炭素化に向けた政策形成への寄与も考えられる。	
11. 対計画等の政府計画も評価可能なツールとして期待できる。まだ中間評価の段階ではあるが、引き続き、本ツールの開発を進めていただき、今後、次のステップとしてマクロなモデルとの連携についても期待したい。	項目7と同様。