

自治体脱炭素支援のためのエネルギー需要推計モデルの開発

Development of an energy demand estimation model to support municipal decarbonization

○重松 朋生 (大阪大学) 山口 容平 (大阪大学) 芳澤 信哉 (大阪大学)
 内田 英明 (大阪大学) 太田 豊 (大阪大学) 下田 吉之 (大阪大学)
 池本 佳史 (関西電力送配電) 南 雅弘 (関西電力送配電) 竹田 圭一 (関西電力送配電)

Tomoki SHIGEMATSU*1 Yohei YAMAGUCHI*1 Shinya YOSHIZAWA*1 Hideaki UCHIDA*1

Yutaka OHTA*1 Yoshiyuki SHIMODA*1 Yoshifumi IKEMOTO*2 Masahiro MINAMI*2 Keiichi TAKEDA*2

*1 Osaka University *2 Kansai Transmission and Distribution, Inc.

To achieve local decarbonization, municipalities need to plan and implement decarbonization measures that are appropriate to local natural and social conditions. Currently, however, the data and tools available to municipalities are insufficient. Therefore, this study developed a model that can estimate energy demand for an entire region while taking regional characteristics into account. Case studies conducted in two regions with different characteristics showed that the developed model can be used to estimate electricity demand taking regional characteristics into account and can be used to analyze future demand in the region.

1. はじめに

地球温暖化対策の推進に関する法律¹⁾は、都道府県、指定都市、中核市及び施行時特例市を対象として「温室効果ガスの排出量の削減」と「温室効果ガスの吸収作用の保全及び強化」を含む地方公共団体実行計画の策定を義務づけている。その他の自治体は策定の努力義務が課せられている。この中では、地域の自然的社会的な条件に応じた施策を計画、実行する必要がある。しかし、現状自治体が利用可能な自治体排出量カルテ²⁾などのツールでは、都道府県別エネルギー消費統計のデータを活動量指標により原単位化し、自治体の活動量との積和により自治体のCO₂排出量を定量化する都道府県按分法が用いられており、自治体のエネルギー使用実態の正確な把握は困難であり、自治体における施策の導入効果が反映されにくい。そうした課題を解決するために電力中央研究所の需要シミュレーションツール³⁾などが開発されているが、将来推計の対象は住宅に限られ、非住宅施設の将来推計は行っていない。そこで本研究では、地域の家庭・業務・産業部門の施設を対象として地域全体のエネルギー需要を将来変動も含めて推計するモデルを開発し、自治体の実行計画策定を支援する枠組みを検討することを目的とした。

2. 地域エネルギー需要推計モデルの開発手法

開発したモデルの概要を図1に示す。本モデルでは、推計対象の施設区分に応じて3つのモデルを用いて需要推計を行う。これら3つのモデルを用いて得られた、家庭・業務・産業部門の需要合計にPV発電量を足したものを地

域需要の推計値とする。電力需要については地域・自治体単位で得られるスマートメータデータを地域需要の実測値とし、推計値と実測値の差が最小になるように調整を行う。また、非住宅施設については対象地域の調査を行い、施設の業態、延床面積を推計し、地域非住宅建築物データベースとして取りまとめ、推計に用いる。

2.1. TREES モデル

TREES モデル⁴⁾は、合成人口・住宅ストックモデルという対象地域に居住する人・世帯の模擬モデルを用いる。本モデルは小地域単位で集計されている国勢調査データに基づいて生成するものであり、居住者は具体的な年齢、性別、就業・就学の有無、職種などの属性を持ち、世帯はその組み合わせとして表現される。住宅仕様についても同様に所有形態、規模、集合戸建などが利用可能であることから、個々の世帯にこれらの条件を付与する。次に、各属性に基づいてエネルギー需要を決定づける主要な因子を特徴づける。対象は住宅仕様や、機器・設備の所有、仕様、使用、また、行動関連の条件であり、実社会のばらつきを再現するようにランダムにサンプリングする。エネルギー需要推計では、各居住者の生活行為を確率シミュレーションにより生成し、生活行為に伴う機器稼働を決定し、各機器のエネルギー消費を積み上げて世帯のエネルギー需要を定量化する。生活行為・機器操作の計算パラメータや機器仕様・所有状況は可能な限り世帯属性・住宅仕様と関連付けて決定しているため、世帯・住宅の集積状況が地域のエネルギー需要に及ぼす影響を反映することができる。TREES モデルでは家庭に設置された PV

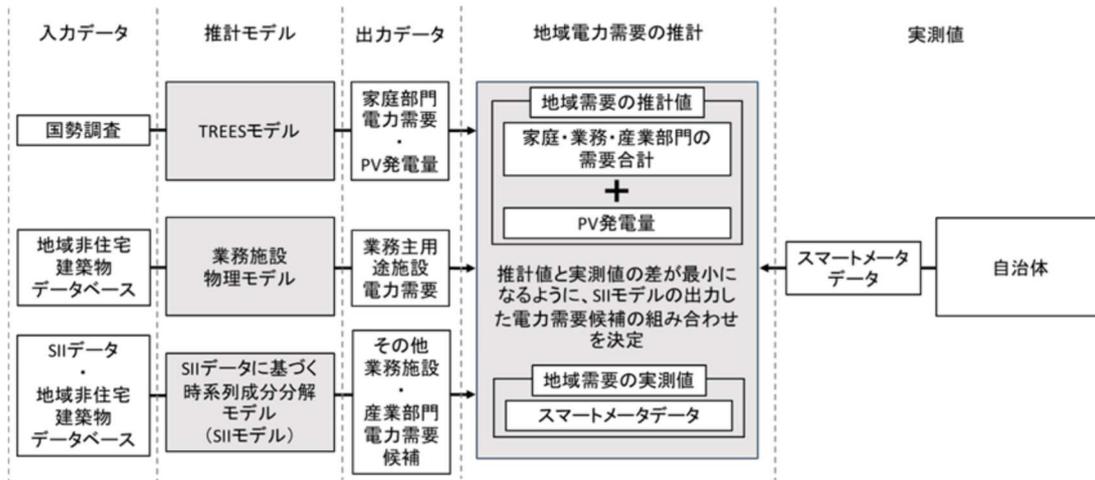


Fig.1 Overview of development model

の発電量も推計することができる。PV 発電量の推計には 1km メッシュ単位の気象データである Amaterass 気象データ⁵⁾を用いて地域性を考慮する。

2.2. 業務施設物理モデル

業務施設物理モデル⁶⁾では、業務施設の代表的な用途である事務所、宿泊、商業、学校、医療、飲食、通信、倉庫・卸売、娯楽の 9 用途を対象とした推計を行う。まず地域非住宅建築物データベースのうち、対象の 9 用途に属する施設について規模・業態で分類された類型を決定する。次に、その類型を代表する建物モデルを用いて米国 DOE が開発した EnergyPlus8.6⁷⁾を用いてエネルギー需要を推計し、推計結果を延床面積で原単位化した後に対象施設の延床面積を乗じることで対象施設の需要とする。各施設の設定については設備採用確率に基づいてランダムサンプリングによって決定される。

2.3. SII モデル

その他の業務部門と産業部門の施設については、環境共創イニシアチブが提供している BEMS 公開データ⁸⁾ (以降「SII データ」)に基づく時系列成分分解モデル (以降「SII モデル」)を利用する。SII データには電力データだけでなく、施設の地域や業態、延床面積などの情報も含まれている。SII モデルではまず、地域非住宅建築物データベースの対象施設と同じ地域・業態の SII データを抽出する。次に各 SII データに対して人の活動への依存性と季節変動性の有無で表される 4 成分と残差成分に成分分解を行い⁹⁾、各成分の挙動を表すパラメータを特徴量として抽出した後、対象施設の延床面積 (契約電力がある場合は契約電力) と対象年の外気温を用いて時刻別電力需要を SII データの個数分生成する。成分分解をする理由は、成分別に将来の変化を想定することで将来推計を行うためである。生成されたロードカーブを対象施設の電力需要の候補として扱い、推計値の調整に利用する。

将来推計時には成分ごとの変化を想定する。業務施設物理モデルの業態別の将来推計結果を前述の手法で成分

分解し、各成分について現在からの変化率を取得する。続いて SII モデルの対象施設のエネルギー需要特性の近い業務施設物理モデルの業態を選択し、その成分別の変化率を適用することで各成分の将来変動を推計する。成分別の変動を想定することで、SII モデルの対象施設についても施設の導入状況を考慮した将来推計が可能になる。例えば、照明が蛍光灯から LED に変化した分は、人の活動による変動があり季節変動がない成分から差し引かれる。ただし、SII モデルは電力需要のみを推計対象としており、ガスや灯油などの燃料の需要推計はできない。

2.4. スマートメータデータを用いた合わせこみ

対象地域全体のスマートメータデータを実測値とし、実測値と電力需要の推計値の合計との差が最小になるように SII モデルで作成した各施設の需要候補の中からそれぞれ一つを選択し、組み合わせを決定する。なお、本研究ではスマートメータデータの代わりに関西電力送配電より提供された配電線の電力値実測データを利用した。

3. ケーススタディによる精度評価と将来推計

3.1. 対象地域の特徴

ケーススタディとして、兵庫県の郊外地域である地域 A と、大阪府の住宅地である地域 B を対象に開発モデルを用いた需要推計を行った。本研究で推計対象とした施設は、地域 A は低圧需要家が 7,084 軒、高圧需要家が 64 軒、地域 B は低圧需要家が 10,846 軒、高圧需要家が 69 軒である。低圧需要家は住宅、高圧需要家は非住宅施設として模擬した。各地域における非住宅施設について、業態を推定した結果を図 2 に示す。地域 A はほとんどが SII モデルの対象施設であるのに対し、地域 B は逆にほとんどが業務施設物理モデルの対象施設であった。

3.2. 設備導入のシナリオ設定

各地域について、PV 容量と家庭用 HP 給湯機の普及率を想定した。PV 容量は一般社団法人太陽光発電協会にて想定された標準ケース¹⁰⁾を、家庭用 HP 給湯機の普及率は

一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターが試算している HP 給湯機のストック台数の推計結果¹¹⁾を参考に設定した。表 1 に導入シナリオを示す。

その他の機器は各モデルの想定シナリオに従った。シナリオでは機器の電化やエネルギー効率の向上などを想定している。TREES モデルでは、住宅の熱性能、暖冷房機器、家電・照明機器の効率などは杉山ら¹²⁾の 2030 年ケース、2050 年対策ケースと同様の設定で推計を行っている。業務施設物理モデルでは表 2 に示す変化を想定した。

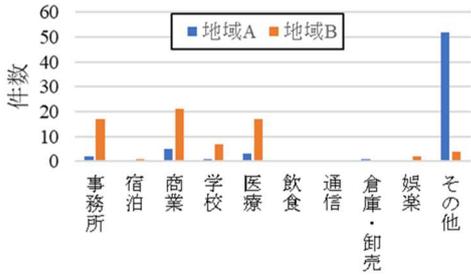


Fig.2 Number of non-residential facilities by business type

Table 1 PV capacity and residential HP water heater installation scenarios

	地域 A			地域 B		
	2021	2030	2050	2021	2030	2050
PV [MW]	21.3	30.7	60.0	2.2	3.7	8.8
HP [%]	17.8	35.6	60.1	4.1	8.3	13.9

Table 2 2030 and 2050 scenarios for the business facility physical model

対策項目	2030 年度	2050 年度
断熱性能	2030 年度におけるストックを想定	全建築物において外壁・窓での断熱を採用
照明	LED 採用率 100%	同左
コンセント機器	2013 年度比 40% 効率向上	同左
空調	2010 年代の技術採用傾向の延長	熱源機器電化及び省エネルギー手法最大限採用
給湯	2010 年代の技術採用傾向の延長	熱源機器の電化

3.3. 現状需要の推計とモデルの精度評価

関西電力送配電から提供された対象地域における配電線の実測値データと推計値を比較した。なお、地域 A の実測値の計測期間は 2021 年度の 4、9、11、3 月の 4 カ月分であり、地域 B は 2021 年度全期間である。また地域 A では 6 つ、地域 B では 7 つの配電線の実測値を利用した。

まず時刻別の挙動を再現できているか確認するため、月別時刻別平均値を比較した。図 3 に地域 A の配電線 b の 4 月と 9 月、図 4 に地域 B の配電線 a の 8 月と 2 月の平均値を示す。青実線が推計値、赤点線が実測値を示す。朝や夜間帯にずれの大きい時間はあるものの、朝と夕方の立ち上がりや昼間の需要の低下を表現できている。

続いて、各配電線についての推計値と実測値の CV(RMSE) [%] を図 5 に示す。なお、地域 A は PV 発電量が

多く実測値に負の値も含まれているため、式 2 に示す CV(RMSE)' という指標を用いている。定義の設定根拠は、任意の配電線 i における実測値 y_i の最小値を全期間の実測値に足すことで実測値全体を正の値に補正後、 $CV(RMSE)' \geq CV(RMSE)$ となる α を決定した。ここで、地域 A の全配電線において共通して $\alpha \times \max(|y_i|) \leq \bar{y}_i$ を満たす最大の α を求めた結果 $\alpha=0.6$ が得られた。この関係が正負の値を持つ実測値についても成り立つと仮定し、CV(RMSE)' を定義した。ASHRAE のガイドライン¹³⁾では CV(RMSE) が 30% を下回割ることを推奨しているが、SII モデルで合わせこみをした地域 A では全ての配電線で 30% 以下を満たした。一方、業務施設物理モデルのみを用いた地域 B では一部の配電線で誤差が大きくなった。

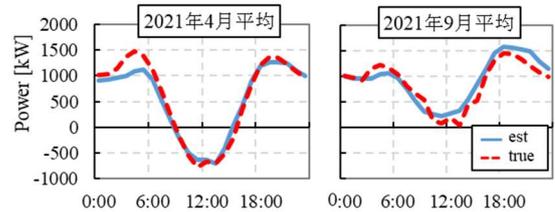


Fig.3 Comparison of monthly time averages for Region A distribution line b

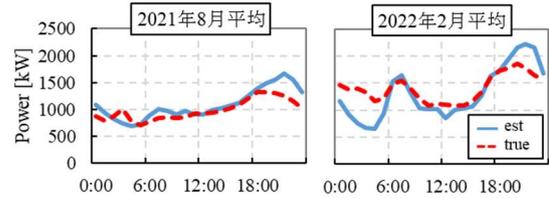


Fig.4 Comparison of monthly time averages for Region B distribution line a

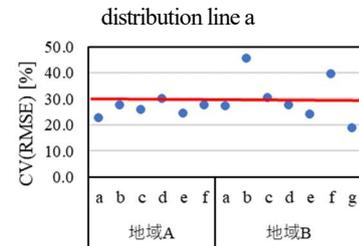


Fig.5 CV(RMSE) [%] for each distribution line

$$CV(RMSE)_i = \frac{RMSE_i}{\bar{y}_i} \tag{式 1}$$

$$CV(RMSE)'_i = \frac{RMSE_i}{0.6 \times \max(|y_i|)} \tag{式 2}$$

3.4. 開発モデルを用いた将来推計

開発モデルを用いて将来の CO₂ 排出量を推計した。図 6 に地域 A、B の年間 CO₂ 排出量を示す。SII モデルの対象施設については電力起源の CO₂ 排出量のみを、その他は燃料起源の排出量も含む。正の方向の住宅・非住宅施設の需要が排出量の増加に寄与し、負の方向の PV が減少に寄与することを示す。黄色の点は排出量の合計値である。推計の結果、CO₂ 排出量は減少傾向であり、PV 容量の大きい地域 A では 2050 年に排出量ゼロを達成可能であることが推計された一方、地域 B では 49% の排出量削減が見込まれ

るものの、脱炭素は実現できないことが推計された。

本モデルはボトムアップモデルの TREES モデルと業務施設物理モデルを用いており、SII モデルでも成分別の変動を考慮しているため、需要の利用用途別の内訳が把握可能である。地域 B 全体の 2 月の低圧・高圧電力需要の利用用途別の内訳について、図 7、図 8 に示す。低圧高圧共に空調需要 (HVAC) を中心に減少傾向である一方、HP 給湯機の増加により給湯需要 (WH) は増加傾向であった。

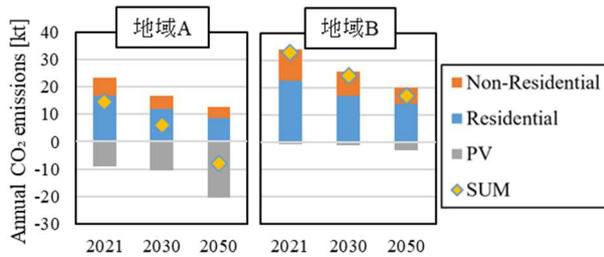


Fig.6 Estimated annual CO₂ emissions

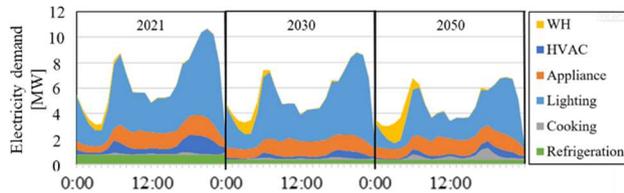


Fig.7 Breakdown of low-voltage demand in Region B by use (February)

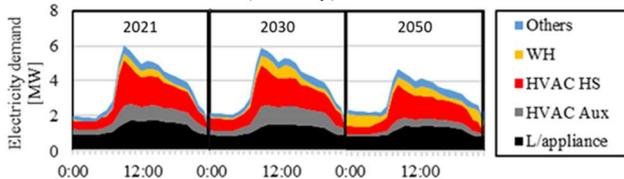


Fig.8 Breakdown of high-voltage demand in Region B by use (February)

4. まとめ

本研究で開発したモデルを用いることで、産業部門の燃料消費を除き、地域の特性を考慮したエネルギー需要の推計が可能であることが確かめられた。本モデルでは将来的な設備の導入状況などを想定可能であり、自治体は施策を計画する上で様々なシナリオを用いて地域の需要の変動を推計することができる。例えば本研究で行ったケーススタディでは、地域 A では現状のシナリオでも地域脱炭素は実現可能であると見込まれることや、地域 B では地域脱炭素には届かないため現状のシナリオに加えて PV 導入の促進などさらなる対策が必要であることなどがわかる。さらに、本モデルでは地域全体の施設を対象とした推計が可能であることにより、配電線負荷などの把握にも利用することができる。これらは既存のツールや研究では達成できていない本モデルの利点であるため、本モデルは自治体の施策の計画、実施に貢献できると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 3 期「スマートエネルギーマネジメントシステムの構築 (JPJ012207)」(研究推進法人: JST) によって実施されました。

参考文献

- 1) 環境省; 地方公共団体実行計画策定・実施支援サイト, https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/overview2.html (最終アクセス日 2024. 1. 23.)
- 2) 環境省; 自治体排出量カルテの説明資料, https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/karte.html (最終アクセス日 2024. 1. 23.)
- 3) 上野剛, 篠原靖志: 地域エネルギー需要シミュレーションツールの開発に向けた地域の住宅群の電力消費推定モデルの構築と精度検証. 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌) 第 142 巻 第 8 号, pp366-375, 2022
- 4) Shimoda, Y., et. al. 2007. Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model. *Energy*. 32-9. pp.1617-1633.
- 5) 太陽放射コンソーシアム; データについて, <http://www.amaterass.org/data.html> (最終アクセス日 2024. 1. 19)
- 6) Yamaguchi Y, et. al. Feasibility assessment of net zero-energy transformation of building stock using integrated synthetic population, building stock, and power distribution network framework. *Applied Energy* 2023;333:120568.
- 7) U.S. Department of Energy: Energy Plus 8.6.0, September 2016, <https://energyplus.net/>
- 8) 環境共創イニシアチブ (SII): エネマネオープンデータ: <https://www.ems-opendata.jp> (最終アクセス日 2024. 2. 1)
- 9) 榎原史哉, 山口容平, 岩井良真, 上林由果, 下田吉之. 業務施設における時系列電力需要の成分分解と需要特性に基づく類型化. *エネルギー・資源学会論文誌* 第 44 巻 第 2 号, pp97-106, 2023.
- 10) JPEA 太陽光発電協会; JPEA ビジョン・PV OUTLOOK 2050 感染症の危機を乗り越え https://www.jpca.gr.jp/wp-content/themes/jpea/pdf/pvoutlook2050_2020.pdf (最終アクセス日 2024. 1. 19)
- 11) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター; 令和 2 年度ヒートポンプ普及見通し調査報告書, https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/press_topics/2020NewsRelease/news_release_siryu.pdf (最終アクセス日 2024. 1. 25)
- 12) 杉山みなみら: 家庭部門エネルギー需要シミュレーションによる 2050 年ゼロエミッション実現可能性の検討, *日本建築学会環境系論文集* 第 85 巻 第 770 号, pp289-298, 2020.
- 13) ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement Of Energy, Demand, And Water Savings