

# 需要シミュレーションツールによる 地域レベルの家庭用ガス・灯油消費量の算出

## Calculation of Area-Level Gas and Kerosene Consumption for each Usage for Residential Houses Using Energy Demand Simulation Tool

上野 剛\*

Tsuyoshi Ueno

In order to consider the conversion of heat sources for CO<sub>2</sub> reduction and the use of the right heat source for the right job, it is necessary to comprehensively understand the energy demand of the entire region, including not only electricity but also other heat sources such as city gas and kerosene. We have developed a simulation tool for regional electricity demand that considers the diversity of consumers and regional characteristics, but it does not have a function for calculating energy demand other than electricity.

**Key words:** Residential Sector, Energy Consumption, Statistical data, Community, Geographic Information System

### 1. はじめに

2020年10月、菅内閣総理大臣は2050年時点でのカーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言した。CO<sub>2</sub>削減のための熱源転換や適材適所の熱源利用を検討するためには、電力のみならず、都市ガス・灯油といった他の熱源も含めた、地域全体のエネルギー需要を総合的に把握することが必要である。地域のエネルギー需要の把握・評価として、建築環境・省エネルギー機構のCASBEE-街区では市街地再開発や住宅地開発等の開発行為(計画)評価を行っている<sup>(1)</sup>。また同様にCASBEE-都市では基礎自治体の環境性能の評価を行っているが、これらでは地域の環境効率の評価基準として、CO<sub>2</sub>排出量を元にした負荷スコアを用いている<sup>(2)</sup>。また環境省では再生可能エネルギーの有効活用を目的として各種建物の熱需要マップ作製を行っており、その中で国内外での熱需要マップの既存事例の調査を行っている<sup>(3)</sup>。また古林は地域熱供給システム導入検討のために秋田県内の住宅用エネルギー消費量ヒートマップを作成している<sup>(4)</sup>。

著者らは、統計データや独自のアンケート調査結果、また地域の気象データ等を用いて、町丁目レベル・コミュニティレベルの地域の需要カーブの特徴を表現でき、また各種のシナリオ分析等が可能な、新たなツールの開発を目指しており、これまでに、国勢調査等の統計データを用いて日本全国の任意の地域(町丁目レベル)の住宅・事業所を対象とした電力需要シミュレーションツール(以降、ツールと呼ぶ)<sup>(5)(6)</sup>を構築し、試算や精度検証<sup>(7)</sup>を行ってきた。しかし、これまでの研究では電力需要のみを対象としており、電力以外の熱源、すなわち地域の特性を考慮した都市ガス・LPガス・灯油の利用によるエネルギー消費量の算出はできて

いなかった。国内の任意地域について、住宅のエネルギー消費量の多寡や消費密度を把握・推定できれば、高効率機器の普及や熱源転換によるCO<sub>2</sub>削減効果の推定や、コージェネレーションや地域熱供給システム等の導入ポテンシャルの推定が可能になると考えられる。そこで本論文ではツールを改良し、電力以外の熱源のエネルギー消費量を推定できる機能を追加すると共に、計算例として群馬県を対象とした試算を行う。

### 2. 需要シミュレーションツール住宅モデルの概要とエネルギー消費量算出モデルの構築

ツール(住宅モデル)は大きく、「地域内の属性別世帯数を推定するモデル」と「住宅内用途別消費電力を推定するモデル」の2つに分けられる。前者は国勢調査の小地域データを用いて、対象とする地域において、世帯の延床面積や世帯人数、住宅種別それぞれの『組み合わせ』ごとの世帯数を推定し、それらの属性を入力条件として後者のモデルに与えるためのものである。後者は世帯の人数・各世帯員の種別や住宅の延床面積等に関する情報を入力とし、その特性に応じて各種統計データを用いて一軒の世帯について用途別の電力日負荷カーブを算出するためのものである。最後に各世帯の日負荷カーブを積み上げることで、地域全体のエネルギー消費を出力する。なお住宅モデルの詳細については既報<sup>(5)(6)</sup>を参照されたい。

本論文では、「住宅内用途別消費電力推定モデル」を改良することで、消費電力のみでなく、都市ガス・プロパンガス・灯油の熱源別に、給湯・暖房・厨房用途のエネルギー消費量の推定を試みる。

従来ツールで各住宅の用途別消費電力を算出するにあたっては、まず世帯別の所有機器を統計値やアンケート調査結果等から決定した普及率に則って決めた上で、日ごと・

\*電力中央研究所エネルギーイノベーション創発センター  
カスタマーサービスユニット 上席研究員  
〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1  
E-mail : ueno@criepi.denken.or.jp

時刻毎の行動を決定し、関連する機器ごとの消費電力を決定していた。冷暖房の消費電力については、使用する住宅の性能や室内外の温度等によって負荷やCOPが大きく異なるために、まず稼働状態(利用しているか否か)を決定した上で、空調負荷計算を行い、消費電力の算出をおこなう。また給湯用の消費電力(エコキュート消費電力)については、日ごとの世帯員の在不在状況や風呂(湯船)や洗面等の利用回数等に基づいて算出した湯量、並びに設定した湯温と気温から推定した市水温度との温度差を用いて、給湯需要を推定した上で、都度、エコキュートのシステム COP で割り戻し、消費電力を算出している。

また厨房用の消費電力(IH コンロ消費電力)については、コンロ利用時の必要熱量を世帯人数の一次式(必要熱量  $Q[W]=236.4 \times \text{世帯人数} + 235.2$ )で決定しており、効率として 0.8 で除すことで消費電力を推定している。

上記はいずれも、関連機器を所有している場合(エアコンの場合は暖房に電気を利用している場合)のみに、世帯の消費電力として加算されるが、計算過程においては、まず需

要量を算出した上で、機器効率や COP で割ることで消費電力を算出している。

そこで、需要量が熱源種別によって変動しない(熱源が異なっても同程度の効用・便益を得ている)という仮定を置いた上で、電力以外の熱源を用いた場合にも、各用途の需要量を各熱源の機器効率で割ることによって、当該熱源種別を利用した場合のエネルギー消費量を算出する。

図 1 に本論文で提案するツールによる計算の全体像を示す。ツールでは、入力として与えられた地域(市区町村・町丁目)に対して、当該市区町村が都市ガス供給エリアか否かを判定した上で、地域の熱源別・用途別の機器利用率を決定する。同時に当該地域の統計情報を用いて、人数別・住宅種別等の属性別世帯数を推定する。推定された各世帯について、その人数・住宅種別の利用率に沿って、所有機器(用途別の熱源)を決定する。その後、先に述べたように各世帯での用途別・熱源別のエネルギー消費量を推定する。ここで、電気の暖房と給湯以外の熱源の機器効率は全て 0.8 としている。

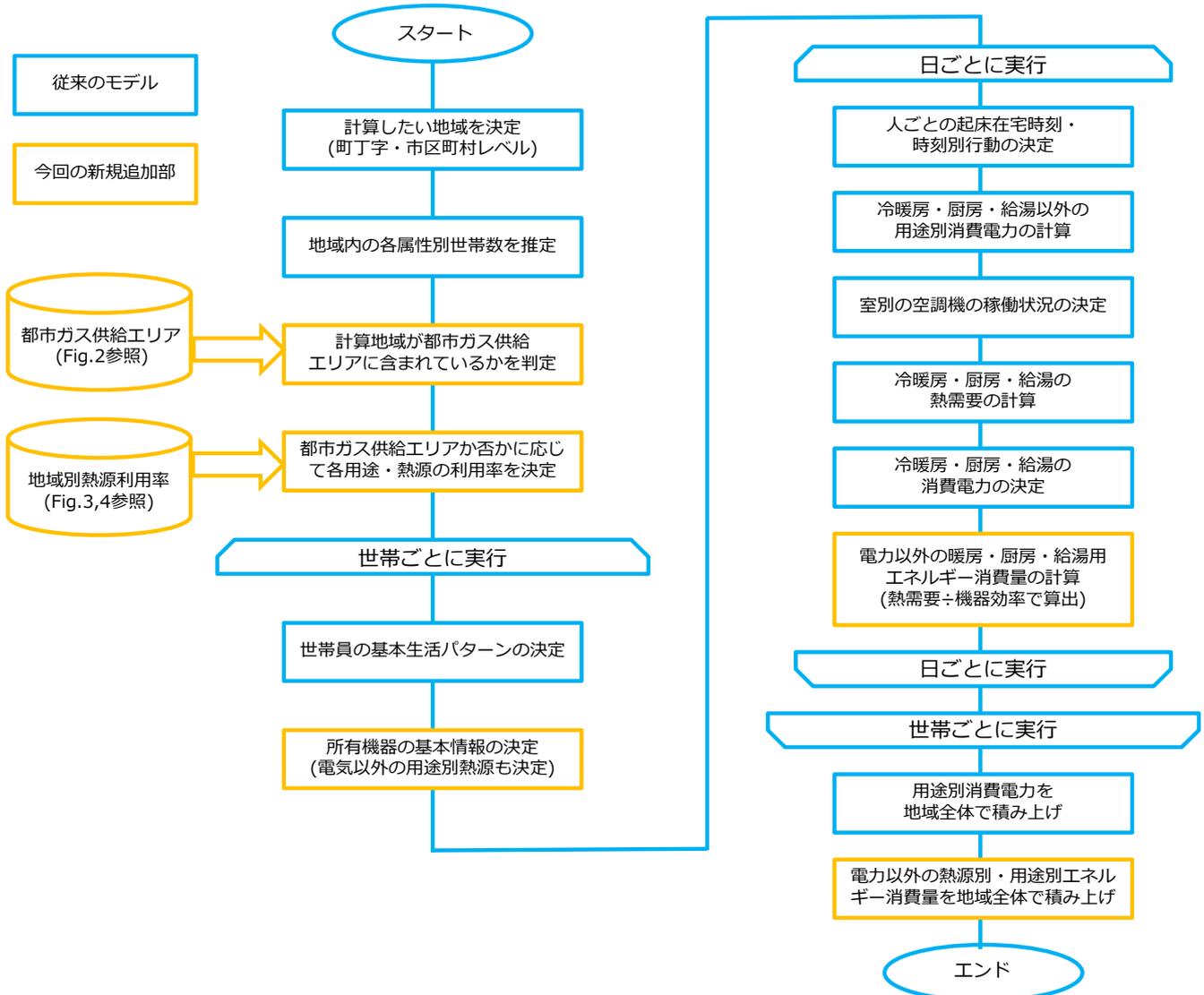


図 1 熱源別エネルギー消費量推定のフロー

### 3. 地域別・用途別の熱源別利用率推定

我が国の住宅で用いられている熱源としては、電気の他、都市ガス、プロパンガス、灯油が大勢を占める。このうち、プロパンガスや灯油は都市ガスの供給エリアでも利用されているが、当然ながら都市ガスは導管のある供給エリア外では利用できない。そこで地域別の熱源利用率の推定にあたっては、まず都市ガスの供給エリアか否かを判定し、そのうえで住宅種別や世帯人数別の熱源利用率を推定する。

なお需要シミュレーションツールでは、町丁目レベルの統計値(世帯数・戸建住宅比率や世帯人数分布)を用いた推定を行っているが、本論文では、得られるデータの制約から、都市ガス供給エリア判定は市区町村レベルを対象とし、また各熱源の用途別利用率は都市ガス供給エリアの場合は都道府県ごとに推定、都市ガス非供給エリアの場合は全国8地域ごとに推定を行う。

都市ガスの供給エリアは、日本ガス協会のウェブサイト<sup>(8)</sup>に記載の一般ガス導管事業者について、各事業者の供給エリア(市区町村レベル)を抽出した。一般ガス導管事業者は、ガス導管網の維持運用・敷設・保守を行っており、上記事業者の対象エリアで、わが国の都市ガス供給エリアの大部分を担っている。

なおガス小売り事業者はガスの供給・小売りを行っており、資源エネルギー庁ではより細かな販売エリア(町レベル)の開示を行っている<sup>(9)</sup>が、本論文では、後述する家庭CO<sub>2</sub>統計の粒度も加味し、市区町村レベルを対象とする。

図2に、供給エリア(市区町村)別の都市ガス事業者数を示す。都市ガス事業者数は197事業者、供給エリア数は846市区町村となった。当然ながら、首都圏、中京、阪神間を始め、人口の多いエリアを中心として都市ガスが普及しているが、大都市及びその周辺以外にも全国に点在して都市ガスが供給されていることが分かる。

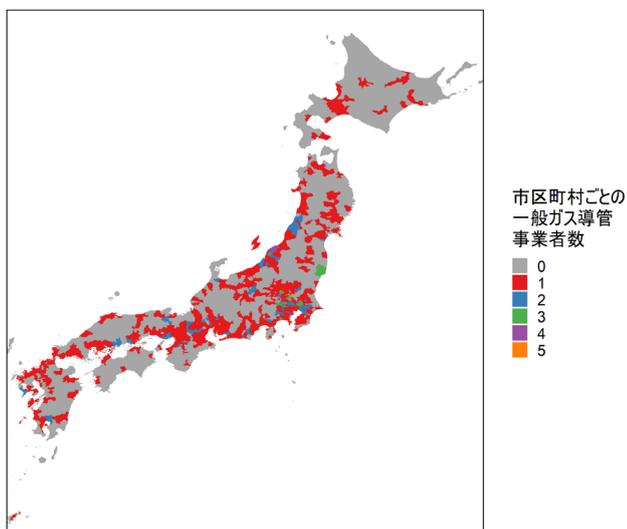


図2 都市ガス供給エリア(市区町村レベル)

次に家庭CO<sub>2</sub>統計データからの地域別熱源利用率の推定について述べる。統計法改定に伴い、従来は統計作成のみに用いられてきた調査票情報が、学術研究目的でも利用可能となった。環境省による家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査データ<sup>(10)</sup>(以下、「家庭CO<sub>2</sub>統計」と呼ぶ)もその一つであり、許可を受けた利用者による調査票の利用が可能となっている。

家庭CO<sub>2</sub>統計は国内各地の約10,000世帯の実在世帯について、アンケート調査に基づいて住宅種別や用途別の利用熱源等が整備され、また所在地として市区町村情報が紐づいたデータである。ここでは、家庭CO<sub>2</sub>統計の平成29年度、平成30年度データを用いて、地域別の用途別利用率の推定を行う。表1に、今回利用した家庭CO<sub>2</sub>統計の主な諸元を示す。回答者が都市部へ偏る可能性があることを踏まえて、各サンプルには重みづけ係数が付与されている。この係数を利用することで、サンプル世帯の代表する世帯群の割合を考慮した分析を行うことが可能である。ここでは本データを用いて、住宅種別(戸建て・集合住宅)・世帯人数種別(単独世帯・複数人世帯)について各用途の熱源別の利用率を推定する。

表1 家庭CO<sub>2</sub>統計の主な諸元

| 対象地域         | 日本全国   |
|--------------|--|
| 利用したデータの調査年度 | 平成29年度<br>平成30年度   |
| 調査世帯数        | 両年とも13,000世帯   |
| 有効回答世帯数      | 9,505世帯(平成29年度)<br>9,996世帯(平成30年度)                                       |
| 調査方法         | 調査員・インターネットモニタ調査   |
| 調査項目         | 地域情報(都道府県、都市階級)、居住者情報(世帯人数等)、住宅情報(住宅形式等)、利用機器(保有台数用途別の最頻利用熱源等)、エネルギー消費量等 |
| 特記事項         | 各サンプルに重みづけ係数が付与  |

図3に推定フローを示すが、基本的には住宅種・人数種別に、各世帯の重み係数を考慮した利用率を集計するのみである。ただし同一住宅種・人数種内の世帯サンプル数が少ない(ここではN<10)の場合には同一住宅種の世帯サンプル全体を対象とする、更に同一住宅種全体の世帯サンプルが少ない場合には、都道府県(地域)内の世帯サンプル全体を対象とし、各熱源の利用率を算出する。また本来は統計年による差異を考慮すべきであるが、連続した年のデータであり、また調査項目自体も連続性を考慮して同内容となっていることから、ここではサンプル数の増加を重視して、2年間のデータを単純に合わせて分析を行うこととした。

家庭CO<sub>2</sub>統計では、本論文で対象とした電気・都市ガス・灯油・プロパンガス以外にもバイオマス利用世帯やそれぞれの用途を未使用の世帯も含まれているが、割合は低いため、ここでの利用率には考慮せず、電気・都市ガス・灯油・プロパンガスの利用世帯の合計値を母数としている。また複数の熱源を利用している世帯もいるが、ダブルカウント

はず、最頻利用熱源だけを用いている。したがって、例えば電気暖房の世帯でも補助暖房として灯油を使用している世帯が含まれる。

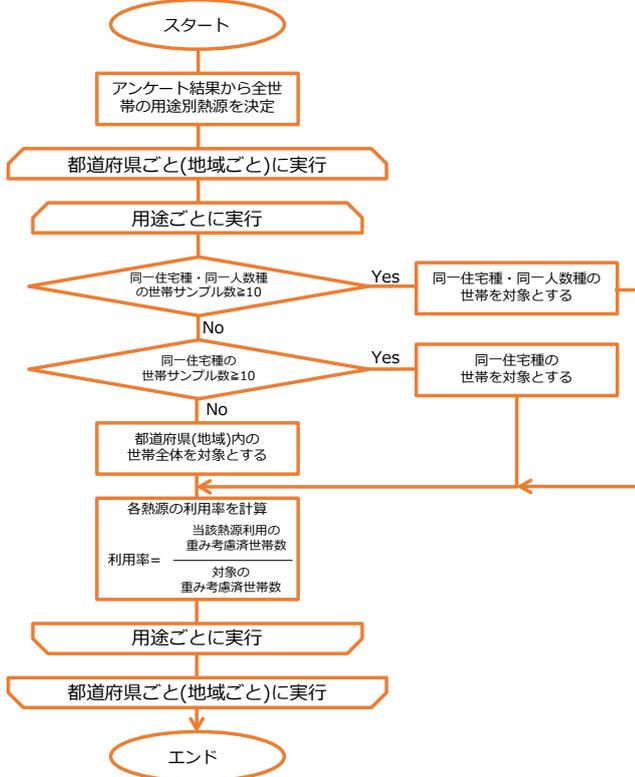
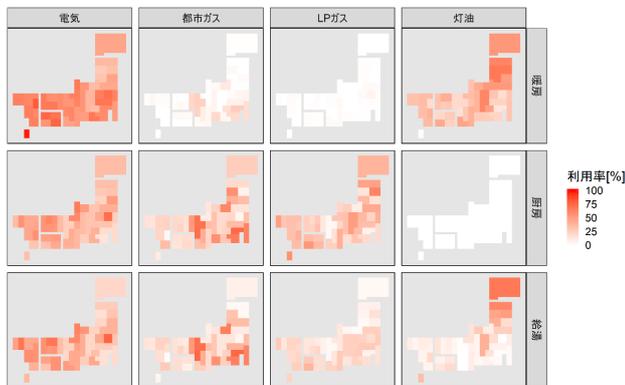
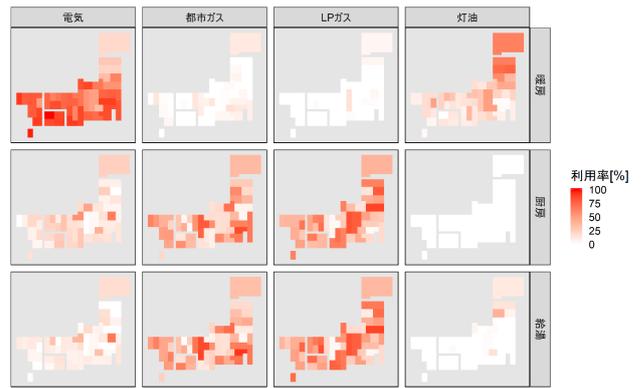


図3 熱源利用率の推定フロー

図4に都市ガス供給エリアにおける各都道府県の熱源別・用途別利用率を示す。ただし例として、戸建住宅・複人数世帯及び集合住宅・単身世帯の結果を示す。住宅種別・世帯人数別それぞれに特徴があったが、どの属性においても寒冷地では暖房に灯油が多く用いられており、温暖地に行くほど電気の利用率が高くなっていった。給湯は戸建て住宅では電気の利用率が高く、集合住宅では都市ガス・LPガスの利用率が高くなっていった。また厨房は電気・都市ガス・プロパンガスいずれも利用されており、灯油はどの属性でも用いられていなかった。



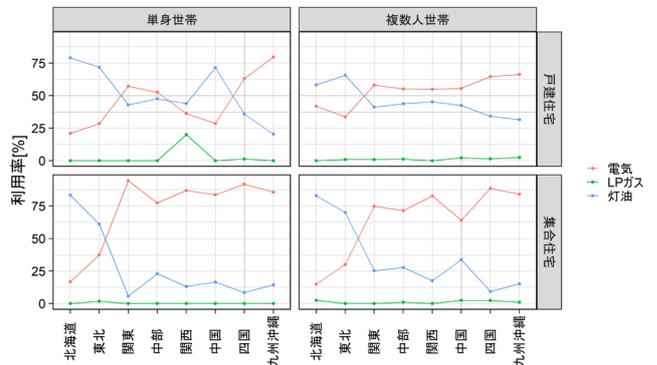
(a) 戸建住宅・複人数世帯



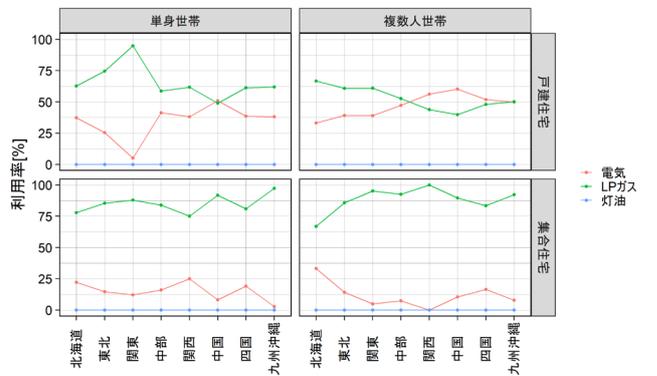
(b) 集合住宅・単身世帯

図4 都市ガス供給エリアの熱源別・用途別利用率

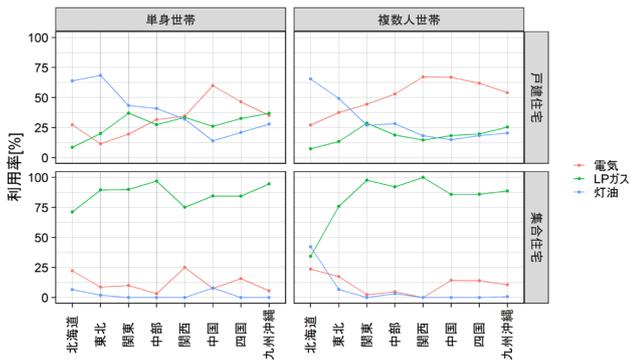
図5に都市ガス非供給エリアにおける各地域の熱源別・用途別利用率を示す。暖房では都市ガス供給エリアと同様、寒冷地ほど灯油の利用率が高く、また集合住宅の方が戸建住宅よりも電気の使用率が高くなり、灯油の利用率が低くなっている。厨房では集合住宅でLPガスの利用率が高いが、温暖地域の戸建住宅では差が小さくなっており、複数人世帯では逆転していた。給湯も厨房と同様、集合住宅ではLPガスの利用率が高くなっていった。戸建住宅では寒冷地ほど灯油の利用率が高く、温暖地では電気の利用率が高くなっていることが分かる。



(a) 暖房



(b) 厨房



(c) 給湯

図5 都市ガス非供給エリアの熱源別・用途別利用率

#### 4. 熱源別エネルギー消費量の算出機能の試算

開発したモデルを用いて群馬県内の全35市町村の住宅を対象に用途別・エネルギー源別のエネルギー消費量の試算を行った。図6に各市町村の世帯数等の基本情報を示す。世帯数では高崎市が最も多く、次いで前橋市、太田市、伊勢崎市、桐生市の世帯数が多くなっているが、多くの地域では10,000世帯以下の地域が多い。一方で各市町村の面積で割った世帯数密度で比較すると、大泉町の世帯数密度が最も高く920[軒/㎡]となっており、次いで伊勢崎市、太田市、前橋市、高崎市となっていた。平均世帯人数は多くの市町村で2-3人となっており、容易に想像されることであるが、延床面積や、戸建住宅率、単独世帯率と強い相関関係にあった。また戸建住宅率はどの市区町村もおおむね高く、80%程度の地域が多い。

図7に、熱源別・用途別の利用率を示す。前章にて求めた地域別・住宅種別・人数種別の利用率、並びに市町村ごとの戸建て住宅の割合や単独世帯の割合から推定された住宅種別・人数種別世帯数を用いて、地域別に算出された結果となっている。都市ガスの非供給エリアでは厨房の熱源はLPガスが最も高くなっているが、都市ガスの供給エリアにおいても利用されており、LPガスと電気の利用率が高くなっている。また暖房は電気の世帯が多いが、灯油も多く用いられている。また給湯は利用されている熱源がばらついており、それぞれ20-30%程度の利用率となっている。

図8に、熱源別・用途別の、世帯別の年平均1日あたりエネルギー消費量を示す。基本的には、熱源別のエネルギー消費量はその利用率(図7)と正の相関にあるが、住宅種別や世帯人数によって世帯あたりの需要量が異なるため、単純な比例とはならない。また電気の暖房・給湯はヒートポンプを利用するためにエネルギー効率が高く、例えば暖房の利用率は灯油よりも電気の方が高い(図7にて赤くなっている)がエネルギー使用量では灯油の方が高くなっている等、地域による逆転が生じている。

また図9に、同地域全体での年平均1日あたりエネルギー消費量を示す。前章に示したように、市町村によって世帯数の差があるため、地域全体でのエネルギー消費量は当然ながら世帯当たりとは異なる。このように、地域によるエネルギー消費量の多寡やエネルギー消費密度が把握できることによって、高効率機器普及や熱源転換の効果推定等、地域に応じた適切な省エネ・省CO<sub>2</sub>施策の計画に資することができる。

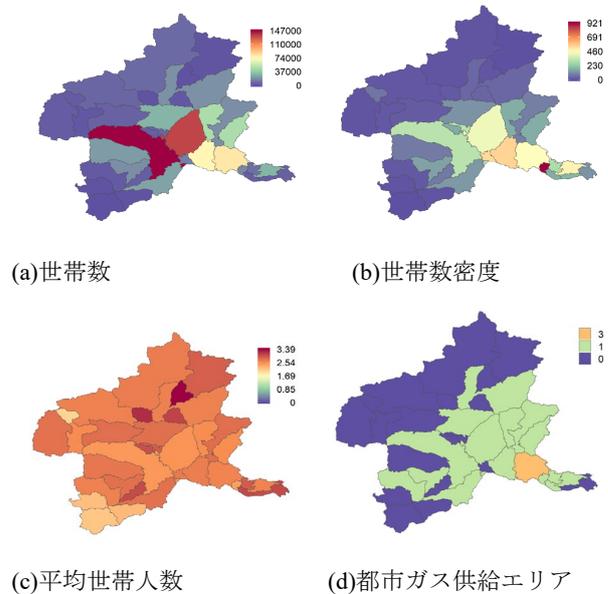


図6 対象市区町村の基本情報

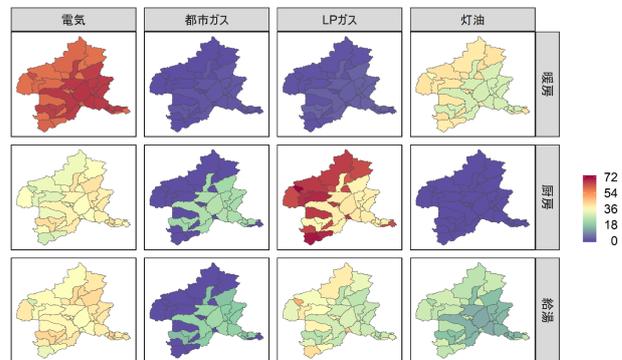


図7 熱源別・用途別の利用率[%]

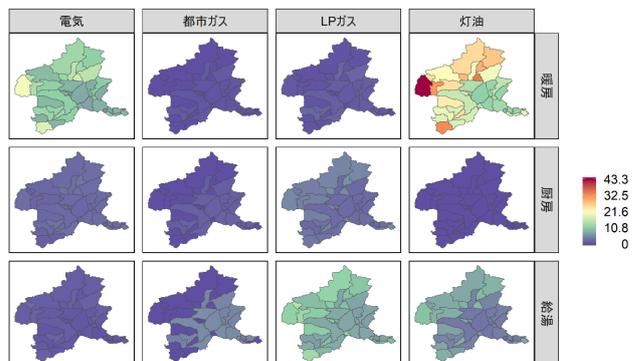


図8 熱源別・用途別の年間エネルギー別消費量(世帯あたり)[MJ/日/世帯]

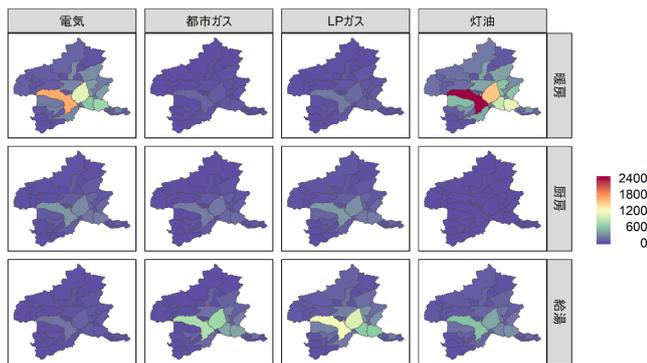


図9 熱源別・用途別の年間エネルギー別消費量  
(市町村合計値)[GJ/日/地域]

## 5. まとめと課題

本論文では、著者らが開発を行っている需要シミュレーションツール(住宅モデル)に電力に加えて都市ガス・LPガス・灯油の熱源別エネルギー需要を計算する機能を追加すると共に、試算例として群馬県を対象に計算を行った。本論文での手法によって、地域合計のエネルギー消費量[GJ/地域]の多寡や密度[GJ/km<sup>2</sup>]を把握できるため、地域に応じた適切な省CO<sub>2</sub>施策の計画等に資することができると考えている。

その一方、本論文での検討には以下課題が残されている。

- ・ 熱需要から機器のエネルギー消費量を算出するにあたっては、需要量が熱源種別によって変動しない(熱源が異なっても同程度の効用・便益を得ている)という仮定を置いている。特に暖房では、熱源の種別によって空調される面積(室全体/採暖)や時間(連続/間欠)、暖房方式(床暖房は放射/接触が主、エアコンは対流が主)が異なることによって、熱需要自体が異なる可能性が大きい。熱源別の利用方法の差異のモデル化等、引き続きの検討が必要であると考えている。
- ・ 統計データからの利用率の算出に当たっては、サンプルの加重平均を用いているが、特に人口の少ない地域については、サンプル数が十分得られていないため、精度が低くなっている可能性がある。家庭CO<sub>2</sub>統計データ等を継続的に利用し、サンプル数の増加やアップデートを図る必要がある。また用いた統計データに紐づく地域レベルは市町村であるため、各熱源の利用率や都市ガスの利用地域は市町村レベルとなっており、市町村内での偏りを考慮できていない。
- ・ 本論文ではエネルギー消費量算出結果の精度検証が行えていない。統計データや実測調査等のデータを用いた精度検証が今後の課題である。
- ・ 本論文では各熱源のエネルギー消費量のみに着目して

いるが、熱源別のCO<sub>2</sub>排出係数が与えられれば、地域別のCO<sub>2</sub>排出量を計算することも可能である。脱炭素社会の構築のためにはCO<sub>2</sub>排出量の推定も重要であり、今後の課題としたい。

本研究では、国勢調査、NHK生活時間調査等の統計データを用いている。また環境省の家庭CO<sub>2</sub>統計のデータ(平成29年度、平成30年度個票データ)を用いている。関連の皆様へ深く感謝する。また地図の描画にはR Shiny<sup>(11)</sup>を介し、Open Street Mapを用いた。本データがOpen Database Licenseの元にもみ利用可能である<sup>(12)</sup>ことをここに明記するとともに、Open Street Map Contributorsの皆様へ深く感謝する。また本論文において特にCO<sub>2</sub>統計に関わる部分(サンプル数等)については文献<sup>(13)</sup>に詳述したため、併せて参照されたい。

## 参考文献

- 1) IBEC CASBEE-街区評価認証  
[https://www.ibec.or.jp/CASBEE/certification/UD\\_certification.html](https://www.ibec.or.jp/CASBEE/certification/UD_certification.html)
- 2) IBEC CASBEE-都市  
[https://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas\\_city/casbee\\_city2013.htm](https://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas_city/casbee_city2013.htm)
- 3) 環境省 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書 第6章 熱需要マップに向けた基礎検討,  
[https://www.env.go.jp/earth/report/h31-01/h29\\_chpt6.pdf](https://www.env.go.jp/earth/report/h31-01/h29_chpt6.pdf), 2019
- 4) 古林, 住宅形態と居住人数を考慮した家庭部門のエネルギー消費量の推計 第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 pp.565-569, 2021
- 5) 上野:「任意の地域における事業所群を対象とした需要シミュレーションモデルの開発」 令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集 204(2019.9)
- 6) 上野:「任意地域の住宅・事業所群を対象とした需要シミュレーションツールの開発」 令和2年電気学会全国大会講演論文集 pp.328-329 (2020)
- 7) 上野, 篠原靖志:「需要シミュレーションツール住宅モデルの精度検証」 令和2年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集 27 (2020)
- 8) 一般社団法人 日本ガス協会 一般ガス導管事業者一覧  
<https://www.gas.or.jp/jigyosya/ichiran/>
- 9) 資源エネルギー庁 登録ガス小売事業者一覧(別紙)一般家庭への販売地点  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/gas/li\\_beralization/retailers\\_list/att.html](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/gas/li_beralization/retailers_list/att.html)
- 10) 環境省 家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査  
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html>
- 11) Shiny from R Studio: <https://shiny.rstudio.com/>
- 12) OpenStreetMap Copyright: <https://www.openstreetmap.org/copyright>
- 13) 上野:「需要シミュレーションツールによる地域レベルの家庭用ガス・灯油消費量の算出」 電力中央研究所報告 C20010 (2021.4)

# 家庭 CO2 統計データの利用方法の検討： エネルギー消費構造の経年変化分析および ライフプランシナリオ別生涯 CO2 排出量の推計

## Analysis of interannual variation of Household Energy Consumption Structure and Estimation of Lifetime CO2 Emissions by Life Plan Scenario Using the Survey on the Actual Conditions of Carbon Dioxide Emissions from Residential Sector

岩 船 由 美 子 \* ・ 河 合 俊 明 ・ 森 裕 子  
Yumiko Iwafune Toshiaki Kawai Yuko Mori

### **Abstract**

The goal of this study is to explore the application potential of the Survey on the Actual Conditions of Carbon Dioxide Emissions from Residential Sector by Ministry of the Environment. We showcased two examples of analysis using the dataset of the survey. One is analysis of interannual variation of household energy consumption structure, in which we used rolling regression models with annual energy consumptions as dependent values and household attributes as independent values to compare the difference between the regression coefficients of each year. Our result suggests with investigating the changes of the coefficients across the ages it is possible to verify the models and evaluate the improvement of energy efficiency of home appliances. Another is estimation of lifetime CO2 emissions by life plan scenario, in which we classified the households into life-stage segments and calculated average CO2 emissions of each segment to simulate the cumulative lifetime CO2 emissions of individual people according to the life plan scenarios considering their choice of dwelling type and household equipment on their life-stage events. Our result shows life with larger family and in apartment building leads to lower emissions, in cold climates and in rural area increase emissions by 50% and 15% respectively.

**Key words** : CO2 emissions, conditional demand analysis, scenario analysis

### 1. まえがき

環境省「家庭部門の CO2 排出実態統計調査」（以下家庭 CO2 統計）は、家庭部門の詳細な CO2 排出実態を把握することを目的に、平成 29 年度より年 1 回実施されている一般統計調査であり、日本国内の約 10,000 世帯を対象としたアンケート調査により、世帯別の種別エネルギー消費量とともに、エネルギー消費量に関連する世帯属性、住宅属性、機器使用情報等が網羅的に調査されている貴重なデータである。従来、家庭 CO2 統計等、公的統計の調査票情報の提供対象は、行政機関および行政機関との共同研究に係るものに限定されてきたが、平成 30 年の統計法改正により、学術研究目的での民間利用にまでその対象が拡大された。今後、家庭 CO2 統計の個票データがより広く利用されることが見込まれるにあたり、多角的な視点から、その利用方法の可能性が検討されるべきである。本研究においては、家庭 CO2 統計の個票データの利用例として、2 つの分析を行った。1 つ目は、過去 3 回分の調査を使用したエネルギー消費構造の経年変化分析である。毎年行われる家庭 CO2 統計は、家庭用エネルギーの経年変化をとらえる重要なデータであ

り、時系列データとしての活用方法が検討されるべきである。その 1 例として、各年毎にエネルギー消費量の回帰分析を行い、算出された偏回帰係数の経年変化を分析した。2 つ目は、ライフプランシナリオ別の生涯 CO2 排出量の算出である。家庭 CO2 統計によって調査されている世帯情報からは、様々なセグメントの作成が可能であり、そのセグメントの平均的なエネルギー消費量を定量化することが可能である。本研究ではライフステージという切り口から世帯をセグメント化し、エネルギー消費量の原単位を算出することで、ライフシナリオ別の生涯 CO2 排出量を推計した。

### 2. エネルギー消費構造の経年分析

回帰分析により得られる偏回帰係数を年毎に比較することで、エネルギー消費量に影響を与える因子の経年変化を分析する。この分析の目的は、偏回帰係数の変化から、世帯構造の変化や住宅性能の向上、家電製品の効率改善がエネルギー消費量に及ぼす影響を定量的に評価できるか、また、モデルの妥当性、ロバスト性の検証が可能かどうかについて検証することである。

#### 2.1 重回帰モデル

使用したデータは、3 年分の家庭 CO2 統計であり、2014

年10月～2015年9月に実施された試験調査および2017年度、2018年度に実施された本調査である（以降、表中、図中にて各調査を2015、2017、2018と記す）。年間エネルギー消費量を目的変数、各世帯の世帯属性、機器使用状況等を説明変数とした回帰分析を3つの調査ごとにおこない、偏回帰係数を比較した。説明変数には、GPVデータのメソ数値予報モデル（MSM：5kmメッシュ気象数値予報モデル）をもとに作成した気温データ（HDD22-24、CDD14-14）も加えている<sup>1)</sup>。各世帯の市区町村情報より緯度経度を算定し、GPVの最寄り格子点のデータをその世帯の気象データとした。MSMは1日8回、3時間ごとに発表される予報データであるため、各予報の0～2時間後のデータを実績値として代用した。

重回帰モデルは2通り作成した。生データを使用したモデル1における偏回帰係数は、他の説明変数が一定という条件で、説明変数が1単位変化した場合の、年間エネルギー消費量の変化量（MJ）を表す。ダミー変数の場合は、それがあつた世帯とない世帯の年間エネルギー消費量の差、という解釈となる。目的変数を対数化し、ダミー変数以外の説明変数を標準化したモデル2における偏回帰係数は、他の説明変数が一定という条件で、連続変数に関しては1単位量変化した場合の、ダミー変数に関しては、0から1へ変化した場合の、年間エネルギー消費量の変化割合を表す。

モデル1、モデル2に加え、対象とする説明変数の違いにより、更に二通りのモデルを作成した。関連する説明変数をすべて投入した「全変数モデル」と、機器保有のみの影響を見る場合に機器の利用方法などの説明変数を除外した「設備保有モデル」である（以降、全変数モデルのモデル1であれば、全変数モデル1という形式で表記する）。例えば、冷蔵庫について、全変数モデルでは保有台数のほかに購入年度や容量、冷蔵庫に関する省エネ行動などの変数を合わせて投入するため、冷蔵庫の有無による差が偏回帰変数に直接反映されない。そのため、「設備保有モデル」では保有台数のみを説明変数候補としている。

回帰分析の偏回帰係数を比較するためには、同一のモデル間で値を比較する必要があるため、各調査に共通する設問のみを変数として使用した。また、設問の選択肢が異なるものに関しては、選択肢の統合等により統一した。

関連性の低い説明変数を除外するため、以下の手順で、説明変数の選択を行った。まず、3つの調査毎に、目的変数に関連すると考えられる調査項目全てを説明変数としてモデルを構築し、有意となった説明変数のみを抽出する。抽出された説明変数で2度目の回帰モデルを構築する。各調査の2度目の回帰モデルで1度でも有意になった説明変数を抽出し、最終モデルの説明変数とした。変数が多数で多重共線性が生じやすいため、VIF統計量が10未満とな

るよう説明変数の取捨選択等、調整を行った。

目的変数が不明な世帯、モデルに使用されている実数回答の説明変数が不明な世帯は、モデルに組み込むことが不可能なので、分析対象から除外した。エネルギー消費量が不明な世帯としては、ガス機器不使用で、ガス消費量がある世帯、あるいは逆にガス消費量がありながら、全てのガス機器を不使用と回答している世帯等、エネルギー消費量とそれにかかる重要な設問に不整合がある世帯も含まれる。その他、コンロ、給湯器の使用状況が不明な世帯、調査期間中に世帯員数の変化、転居、増改築、給湯器、厨房機器の変更等があつた世帯、重複していると考えられる世帯（住んでいる市区町村と電力消費量12か月分が全て一致している試験調査26ケース、2017年度調査1ケースは、重複世帯のうち1世帯のみを分析対象とした）は除外した。また、例外的な世帯としてコンロ、給湯器、冷蔵庫のいずれかを使用していない世帯およびメインとなる給湯器を2種類以上使用している世帯（電気HPとガス給湯器の併用等）も除外した。

## 2.2 偏回帰係数の経年変化分析

### (1) モデルの妥当性、ロバスト性の検証

偏回帰係数の経年変化に一貫性があるか、常識に相反した値となっていないかを確認することで、モデルの妥当性、ロバスト性の検証可能性について分析する。モデルの妥当性、ロバスト性を損なう原因としては、サンプリング誤差、交互作用、欠落変数バイアス、非線形効果、目的変数の非正規性（残差の非正規性）が考えられる。モデル作成時点で既知の問題点として、モデルの解釈のしやすさを優先したため、説明変数の交互作用や非線形効果については考慮せず簡易な説明変数を用いた点、また、エネルギー消費量は一般的に対数正規分布に近い分布形状をしているため、モデル1は、残差の正規性という回帰分析の前提が満たしていない点が挙げられる（モデル1の偏回帰係数の値については、実際の機器の使用電力量と比較することで、全体的な妥当性が確認されている<sup>2)</sup>）。サンプリング誤差については、使用率の極端に低い機器等で偏回帰係数の値が不安定に変動する事態が想定される。

モデルの妥当性の検証事例として、年間エネルギー消費量（ガソリン、軽油を含まない種別エネルギーの合計）を目的変数とした場合の全変数モデル1と全変数モデル2における調査方法=ネット、主暖房=不使用、太陽光発電=使用の偏回帰係数を図1に示す。棒グラフのヒゲは95%信頼区間における誤差範囲を表している。有意でない偏回帰係数は、グラフ上に表示していない。まず、調査方法=ネットについてであるが、一般的には調査方法がネットであることがエネルギー消費量の少ないことの直接的な原因とは考えられない。しかし、どの調査年においても一貫してマイナ

スの偏回帰係数となっており、値も安定していることから、調査方法はエネルギー消費量と間接的な関係があり、偏回帰係数も妥当な数値であると考えられる。つまり、モデルにはコントロールされるべき何らかの変数が欠落しており、この変数を介して調査方法とエネルギー消費量に間接的な関係が生じていると推察できる（例えば、ネットリテラシーの高さと省エネ意識に相関がある等が考えられる）。主暖房=不使用については、モデル1ではプラス、モデル2では2017年と2018年でマイナスとなった。電気エアコンが主暖房である世帯に対して、暖房を使用していない世帯の方が、エネルギー消費量が多くなるという結果は、常識に反するものでありモデル1は、この点で妥当性を欠いている。モデル1とモデル2で使用されている説明変数は、ほぼ同じであり、他の説明変数の影響が原因である可能性は低い。モデル1は、前述のとおり、残差の正規性を満たしておらず、誤差は、目的変数が小さい場合と大きい場合に特に大きくなる。暖房不使用世帯は、年間エネルギー消費量の小さい世帯が多いと考えられるため、モデル1の非正規性が原因となっている可能性がある。太陽光発電については、2017年と2015年のモデル2においてマイナスの数値が出ているが、2018年には有意になっておらず一貫性がない。エネルギー消費量は、太陽光発電の自家消費分も含んだ数値であるため、太陽光発電の発電量がエネルギー消費量に影響を及ぼすことは考えられない。太陽光発電を使用している世帯の省エネ意識が高い可能性や、発電量や売電量の回答精度の低さが原因である可能性等、他の要因が介在していると考えられる。



図1 偏回帰係数によるモデルの妥当性検証

### (2) 世帯属性、住宅属性要因の経年変化

偏回帰係数より、年間エネルギー消費量に対する世帯属性、住宅属性の影響がどのように変化したのかを検証する。年間エネルギー消費量は年によって変わるため、モデル2で偏回帰係数の経年変化をみると世帯属性、住宅スペックの変化はすべて誤差範囲内であった(図2)。世帯員数当たりのエネルギー消費量は、誤差範囲内であるが増加傾向にあり、世帯規模の縮小に伴い、世帯員1人あたりのエネルギー消費量が増えている可能性がある。HDD, CDD, 延床面

積, 建て方等は、明確な増加傾向, 減少傾向はみられない。世帯年収については、影響が小さくなっている傾向があり、理由は不明である。



図2 世帯属性、住宅属性要因の経年変化

### (3) 機器効率の経年変化

偏回帰係数の経年変化を分析することで、住設機器、家電製品の効率の変化を分析できる可能性がある。機器効率の変動は、使用台数のみならず、使用状況、機器スペックを全てコントロールした上で評価する必要があるが、全変数モデルを使用して、機器効率（または、それに代わる製造年等の変数）以外の全ての変数をコントロールするのは困難であり、また、変数が多すぎるため解釈が難しい。よって、年間電力消費の設備保有モデル1とともに気象データ、機器スペック、機器使用状況のデータの単純集計もあわせて分析することで、機器効率の経年変化を分析する。

ストックベースの機器効率改善が期待できる機器としては、冷蔵庫、テレビ、エアコン、電気HPが考えられる。冷蔵庫、電気HP給湯機、電気温水器は偏回帰係数が減少傾向にあるが、誤差を考慮した場合は、電気温水器のみ偏回帰係数の明らかな減少傾向がみられる。(図3)。冷蔵庫の2015年と2018年は、5%有意水準では有意な差はないが、10%水準では有意な差がある。冷蔵庫の平均サイズは、2015年が356.5L、2018年が367.5Lと増加しており、かつ、平均気温は2015年が14.8℃に対して、2018年が15.5℃と高く、2018年の方が冷蔵庫の電力消費量が多くなる条件が揃っているため、2018年は2015年に比べて機器効率の改善効果があったと考えるのが妥当である。電気HP給湯機は、2015年と2017年を比較すると有意に減少している。一方、電気温水器は電熱式機器のため機器効率の大幅な改善は望めないはずであるが、明らかに減少傾向にある。電気HP給湯機使用世帯の2015年と2017年の機器使用状況を比較すると、平均世帯員数は3.31から3.13に減少、平均気温は2015年が14.9℃に対して2017年が14.7℃とやや低く、週当たりの平均湯沸かし回数は、夏季が4.05回から4.30回と増加、冬季は6.07回から6.00回と微減しており、電力消費量の増加要因、減少要因がともにあるため、機器効率の改善効果があったとは明言できない。電気温水器につ

いては、平均世帯員数は減少傾向、湯沸かし回数も夏季、冬季共に減少傾向のため、これらが電力消費量を減少させた可能性がある。テレビは、明確な傾向はなく、冷房用エアコンは偏回帰係数が増大傾向にあり、機器効率の改善とは逆の傾向であるが、冷房用エアコンの平均使用時間は、2015年が7.23時間、2017年が7.62時間、2018年が9.26時間と増大しているためと考えられる。また、冷房用エアコンの偏回帰係数は、暖房用途の影響も受けると考えられるが、2017年はHDDが最大、2018年はCDDが最大であることも同じく電力消費量の増大原因となった可能性がある。なお、省エネ行動についても併せて確認したが、どの機器についても、大きな変化は見られなかった。



図3 機器効率の経年変化

### 2.3 エネルギー消費構造の経年分析まとめ

家庭CO2統計の3年分のデータを回帰分析し、偏回帰係数の比較を行った。まず、偏回帰係数の一貫性および常識的な見地からの整合性の評価により、モデルの妥当性ととも、調査データ自体の信頼性についても検証が可能であることが分かった。次いで、世帯や住宅属性の偏回帰係数の経年変化については、経年による有意な差は見られなかったが、世帯規模の縮小により世帯員一人当たりのエネルギー消費量が増加傾向にある可能性が示唆された。最後に、各機器の偏回帰係数の変化から機器効率の改善状況を検証した。機器効率の改善については、年によって使用状況があまり変化しないと考えられる冷蔵庫のみ確認ができた。電気HP給湯機等は、世帯員数の減少という電力消費量の減少要因があるため、判断が困難であった。こうした機器効率以外の要因のコントロールは今後の課題であり、交互作用項をモデルに組み込むか、あるいは、目的変数を1人当たりの電力消費量にする等工夫が必要である。今回使用したデータの期間は4年間と短く、経年変化を分析するには不十分であり、偏回帰係数の経年変化について明確な傾向を見出すことが困難であった。今後、蓄積されたデータにより、機器効率や住宅性能の経年変化がより明確に偏回帰係数に反映されることが期待できる。

### 3. ライフプランシナリオ別生涯CO2排出量の推計

親元からの独立、結婚、家族の増減といった様々なライフステージにおいて個人のエネルギー消費量は変化していく。また各ターニングポイント（ライフステージの変わり目）における選択の違いにより、生涯の累積エネルギー消費量およびCO2排出量も異なってくる。家庭CO2統計のデータを使用し、数種類の代表的なライフプラン（ライフステージの経年変化）のシナリオを想定して、生涯のCO2排出量を推計した。

#### 3.1 推計方法

2018年度調査の家庭CO2統計データのうち、世帯構成が変化しなかった9101世帯より、想定したライフステージと同じ世帯属性を持つ世帯を抜き出し、その一人当たりCO2排出量を、住宅の建て方、地域、住宅設備といった因子でクロス集計して平均したものをライフステージ別CO2排出量とした。さらに代表的なライフプランのシナリオに合わせて累積し、生涯CO2排出量を算出した。

#### 3.2 ライフステージとライフプランシナリオ

家庭CO2統計データの世帯属性の構成割合の大きい①単身(20.5%)、②夫婦(世帯主と配偶者の二人世帯・27.6%)、③親と同居(夫婦と子の3人世帯・15.9%)、④夫婦+子供(夫婦と子供2人の4人世帯・12.4%)の4種類を本推計で想定するライフステージに選出し、その変遷であるライフプランのシナリオを4種類設定した。すべてのシナリオにおいて18歳までは親と同居し、その後結婚や出産、家族との別離といったターニングポイントで同居する人数を変化させながら90歳までの生涯を考慮した。

表1 基本的なライフプランのシナリオ

|          | 年齢-18 | -25  | -30  | -35   | -40   | -45   | -50   | -55   | -60  | -65 | -70 | -75 | -80 | -85 | -90 |
|----------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 単身・一人暮らし | 親と同居  | 単身   | 単身   | 単身    | 単身    | 単身    | 単身    | 単身    | 単身   | 単身  | 単身  | 単身  | 単身  | 単身  | 単身  |
| 単身・親と同居  | 親と同居  | 親と同居 | 親と同居 | 親と同居  | 親と同居  | 親と同居  | 親と同居  | 親と同居  | 親と同居 | 単身  | 単身  | 単身  | 単身  | 単身  | 単身  |
| 夫婦二人暮らし  | 親と同居  | 単身   | 夫婦   | 夫婦    | 夫婦    | 夫婦    | 夫婦    | 夫婦    | 夫婦   | 夫婦  | 夫婦  | 夫婦  | 夫婦  | 単身  | 単身  |
| 四大家族     | 親と同居  | 単身   | 夫婦   | 夫婦+子供 | 夫婦+子供 | 夫婦+子供 | 夫婦+子供 | 夫婦+子供 | 夫婦   | 夫婦  | 夫婦  | 夫婦  | 夫婦  | 単身  | 単身  |

#### 3.3 推計結果

##### (1) ライフプラン別生涯排出量

生涯CO2排出量(累積量)を図4に示す。ただし試算結果には自動車由来の排出量は含まれておらず、世帯属性の変化による排出量の違いのみを考慮した。

生涯CO2排出量は、単身・一人暮らし、夫婦二人暮らし、単身・親と同居、四大家族の順に多く、四大家族ライフプランは単身・一人暮らしライフプランよりも19%減少している。共に過ごす家族の人数と過ごす時間が多いほど生涯の排出量は少ないことがわかる。

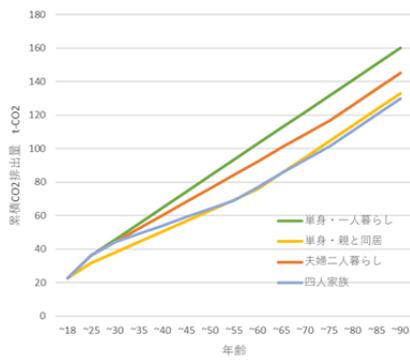


図4 ライフプラン別累積CO2排出量

(2) 建て方を考慮したライフプラン別生涯排出量

4種類の基本的なライフプランに、住宅の建て方(戸建て/集合住宅)の違いを考慮する。親と同居する実家は戸建てとし、40歳で戸建てを建築するか否かと、老後単身になった際に集合住宅に住み替えるか否かの選択肢を追加する。累積排出量を図5に示す。親と戸建てに同居中は、独立して集合住宅に一人暮らしの場合と同じくらいの排出量であるが、親との死別後、一人で戸建てに住み続けると排出量は増加する。夫婦、四大家族の場合、戸建てを建設することで排出量は増加し、子の独立で増加する。配偶者との死別後に戸建てに住み続けるとさらに増加する。最も生涯排出量が多かったのは、親と同居・老後住み替えなしのライフプランであった。逆に最も少なかったのは四大家族・集合住宅ライフプランで、両プランの間には50t-CO2以上の差があった。

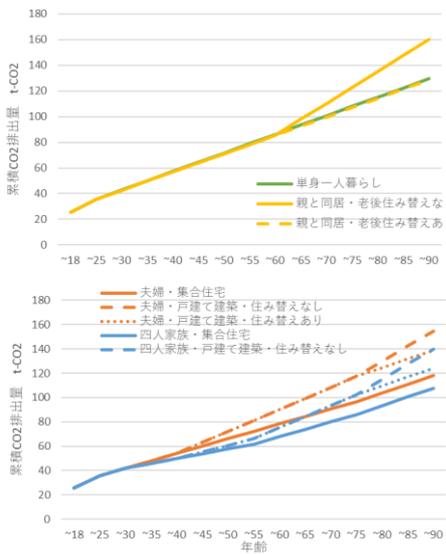


図5 建て方別累積CO2排出量

(上:単身・親と同居 下:夫婦・4人家族)

(3) 地域を考慮したライフプラン別生涯排出量

基本的なライフプランに、住宅の建て方(戸建て/集合住宅)に加えて、居住地が温暖地か寒冷地かによる違いを考慮する。寒冷地とは、北海道、東北、北陸とし、温暖地はそれ以

外し、住み替え時に地域を超える移動はないものとした。累積排出量を図6に示す。寒冷地の排出量は、どのプランにおいても温暖地の約1.5倍になった。さらに寒冷地の排出量は、ライフプランのシナリオによる幅も大きいことがわかる。

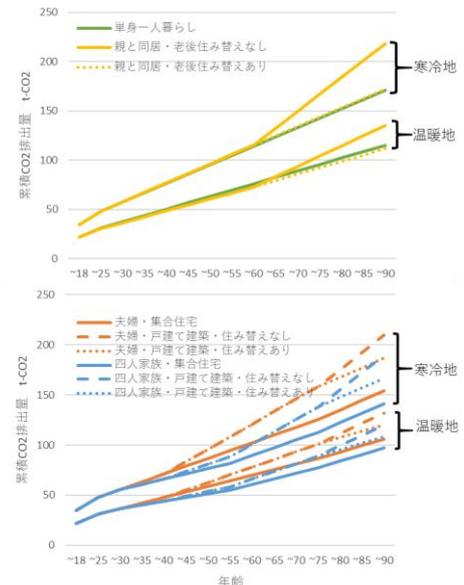


図6 地域別累積CO2排出量

(上:単身・親と同居 下:夫婦・4人家族)

基本的なライフプランに、住宅の建て方(戸建て/集合住宅)に加えて、都市区分(大都市・中都市・小都市)による違いも同様にして推計したところ、大都市と中都市の差はあまりなかったが、小都市の排出量は大都市・中都市に比べて約15%多くなった。小都市は寒冷地域の割合が大きく、戸建ての割合も大きいためであると考えられる。

(4) 住宅設備を考慮したライフプラン別生涯排出量

基本的なライフプランに、住宅の建て方(戸建て/集合住宅)に加えて、住み替えの際に、オール電化/非オール電化、PVあり/なし(戸建ての場合)で分岐する21種類のライフプランのシナリオを想定した(表2)。ただし親と同居(=実家)は戸建て(非オール電化・PVなし)とし、夫婦または四大家族のライフプランで戸建てを建築後、単身となって住み替える場合は、オール電化戸建てからはオール電化集合に住み替え、非オール電化戸建てからは非オール電化集合に住み替える想定した。

表2 住宅設備を考慮したライフプランのシナリオ

|    |      |                         |    |                         |
|----|------|-------------------------|----|-------------------------|
| 1  | 単身   | 集合住宅暮らし                 | 14 | 集合住宅暮らし                 |
| 2  |      | オール電化集合住宅暮らし            | 15 | オール電化集合住宅暮らし            |
| 3  |      | 老後住み替えなし                | 16 | 戸建て建築・住み替えなし            |
| 4  | 親と同居 | 老後単身で集合住宅暮らし            | 17 | PV付戸建て建築・住み替えなし         |
| 5  |      | 老後単身でオール電化集合住宅暮らし       | 18 | オール電化戸建て建築・住み替えなし       |
| 6  |      | 集合住宅暮らし                 | 19 | オール電化PV付戸建て建築・住み替えなし    |
| 7  |      | オール電化集合住宅暮らし            | 20 | 戸建て建築・単身で集合住宅へ住み替え      |
| 8  |      | 戸建て建築・住み替えなし            | 21 | オール電化戸建て建築・単身で集合住宅へ住み替え |
| 9  |      | PV付戸建て建築・住み替えなし         |    |                         |
| 10 | 夫婦   | オール電化戸建て建築・住み替えなし       |    |                         |
| 11 |      | オール電化PV付戸建て建築・住み替えなし    |    |                         |
| 12 |      | 戸建て建築・単身で集合住宅へ住み替え      |    |                         |
| 13 |      | オール電化戸建て建築・単身で集合住宅へ住み替え |    |                         |



され、トップランナー制度や住宅性能向上等による政策のマクロな効果を検証することが可能になることが期待される。ライフプランシナリオ別生涯 CO2 排出量推計については、ライフステージという切り口から、CO2 排出量の増加要因について新たな視点を導入し、結婚や子供の独立といったターニングポイントにおいて、適切な住み替えや機器選びを行うことが、家庭部門における CO2 排出量の低減に大きく貢献する可能性が示唆された。既に、高齢世帯において、子供の独立後も広く古い住宅に住み続けることが、エネルギー消費量の増加の一因となっている可能性が指摘されており<sup>3)</sup>、こういった住宅や住設機器と世帯属性のミスマッチの解消が、今後の省エネ政策において重要な課題となると考えられる。省エネ政策に関する提言を行う上で、家庭 CO2 統計のデータの有用性は更に高まると考えられ、より多角的な視点から分析が行われることが期待される。

## 謝辞

本研究は、環境省委託業務「令和 2 年度民生部門における脱炭素化対策・施策検討委託業務」において実施したものである。

## 参考文献

- 1) 東京大学生産技術研究所喜連川研究室の GPV Data Archive のデータを利用した; <http://apps.diasjp.net/gpv/>
- 2) 岩船由美子, 河合俊明; 家庭からの二酸化炭素排出量の推計に係る実態調査に基づく家庭部門のエネルギー消費構造分析, 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2018)
- 3) 八木田克英, 河合俊明, 岩船由美子; 高齢世帯のエネルギー利用に関する現状や問題点, 第 35 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2019), pp.292-297

# 地域別家庭 CO<sub>2</sub> 排出量の推定手法の開発：地域別環境政策立案にむけて

## Development of a Method for Estimating Household CO<sub>2</sub> emissions by region: Toward the Formulation of Environmental Policies by Region

鷲津 明由 \*・中野 諭 \*\*

Ayu Washizu

Satoshi Nakano

### Abstract

Household CO<sub>2</sub> statistics are a valuable statistical survey that can directly analyze the relationship between people's energy-saving behavior, household-use energy-saving technology, and household CO<sub>2</sub> emissions. On the other hand, when formulating regional environmental policies, there is a need to capture household CO<sub>2</sub> emissions related to specific local regions. However, since household CO<sub>2</sub> statistics are sample surveys, the local government may not always be able to obtain information about its own area. Therefore, we have developed a method for capturing household CO<sub>2</sub> emissions in a specific area. According to this method, it is possible to estimate household CO<sub>2</sub> emissions by residents living in a specific area using information such as the average age and household attributes of the residents in that area, which are often captured by the census and other government statistics. Currently, policies are underway in each region of Japan to build smart cities that optimize energy consumption and transportation. This study will contribute to advancing these policies in an evidence-based manner.

**Key words** : CO<sub>2</sub> intensity for housing, household CO<sub>2</sub> statistics, Evidence based policy making, Smart city

### 1. はじめに

現在、多くの都市、地域においては、人口減少、高齢化、災害多発、感染症リスク等の様々な社会課題に直面している<sup>1)</sup>。このような中で ICT 等の新技術を活用して、あらゆるマネジメントの高度化により、諸課題の解決と新たな価値の創出を行うという表 1 のようなスマートシティプロジェクトが展開されている。スマートシティ官民連携プラットフォーム<sup>2)</sup>では、これらのプロジェクトを連携させ、スマートシティの円滑な構築を図っている。

表 1 スマートシティプロジェクト一覧

| 実施<br>省庁 | 事業名                               | 内容                           |
|----------|-----------------------------------|------------------------------|
| 内閣府      | SIP アーキテクチャ構築及び実証研究 <sup>i)</sup> | デジタル化によるスマートシティ構築のための手順作成    |
|          | 近未来技術等社会実装事業 <sup>ii)</sup>       | スマート化を地方創生に繋げる               |
| 総務省      | データ利活用型スマートシティ推進事業 <sup>iv)</sup> | 複数分野のデータを収集し分析等を行うプラットフォーム整備 |
| 経済産業省    | 地域新MaaS創出推進事業 <sup>v)</sup>       | スマートモビリティの社会実装               |
| 国土交通省    | スマートシティモデル事業 <sup>vi)</sup>       | スマートシティ実行計画策定に向けた支援          |
|          | 新モビリティサービス推進事業 <sup>vii)</sup>    | 新たなモビリティサービスの実証実験、ガイドライン策定   |

そのようなプロセスにおいて事業がもたらす効果のアセスメントは重要であり、中でもスマートシティ構築がもたらすエネルギー・環境効果が注目される<sup>2)</sup>。スマートシ

ティにおける住宅やモビリティのマネジメント強化がもたらすシステム技術の効果検証はみられるものの<sup>3)</sup>、具体的な自治体単位、地域単位などの効果検証はなされていない。このことの要因として、それぞれの地域の特性に応じて多様性を持つ住宅や自家用車のエネルギー消費実態を捕捉することが難しいことが考えられる。

ところで、平成 29 年度に調査が開始された環境省「家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査（家庭 CO<sub>2</sub> 統計）」は、家庭のエネルギー消費に伴う CO<sub>2</sub> 排出実態を家庭の社会的な世帯属性と同時にその背景となる技術条件（太陽光発電装置や電気自動車の有無など）とともに調査している貴重なデータベースである。そこで、鷲津・中野<sup>4)</sup>は、家庭 CO<sub>2</sub> 統計の調査結果を用いて、エネルギー消費に影響する主要な世帯属性と技術特性から住宅のエネルギー消費原単位を推定する手法を開発した。通常、世帯主年齢や世帯所得などの代表的な世帯属性情報は、国勢調査等の基幹統計で地域別に詳しく捕捉されている。鷲津・中野<sup>4)</sup>が開発した手法を用いれば、住宅やモビリティに関するいろいろなシステム技術の開発効果を特定の地域に固有の世帯属性と組み合わせることで、当該地域に限定した技術開発効果を検証できる。

本研究は鷲津・中野<sup>4)</sup>の研究内容を住宅の他に自動車のエネルギー消費にも発展させ、また、評価指標もエネルギー原単位よりも使用機会の多い CO<sub>2</sub> 排出量としたものである。本研究の成果を用いれば、各地域で実施されている表 1 のようなスマートシティプロジェクトの具体的効果の検証を可能にし、スマートシティ構築のためのガイドライン策定などに貢献することが期待できる。

\*早稲田大学社会科学総合学術院教授

〒169-8050 新宿区西早稲田 1-6-1

E-mail: washizu@waseda.jp

\*\*日本福祉大学経済学部教授

〒477-0031 愛知県東海市大田町川南新田 229 番地

## 2. 方法

鷲津・中野<sup>4)</sup>で開発した推定手法を応用して、スマートシティプロジェクト等に取り組むどの地域に対しても、1世帯当たりの家庭CO<sub>2</sub>排出原量(住宅および自動車によるエネルギー消費を起源とするもの)を算定できるようにしたい。この目的に対して、本研究では以下の項目を実施した。

(1)まず、平成30年度家庭CO<sub>2</sub>調査のマイクロデータを用いて、各世帯の住宅または自動車によるCO<sub>2</sub>排出量を被説明変数、それに影響する世帯要因を説明変数とする回帰分析を実施して回帰係数を推定し、これに(2)特定のスマートシティにおける世帯要因の統計値(平均値)を与えて、各スマートシティの1世帯あたりCO<sub>2</sub>排出原単位を推算する。

ここで、住宅による1世帯あたりCO<sub>2</sub>排出量の推算については、次の二つの方法による結果を比較している。つまり1世帯あたりのCO<sub>2</sub>排出量そのものを被説明変数として回帰分析を実施する方法と、世帯の床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量を被説明変数として住宅の面積階級に区分されたサブサンプルごとに回帰分析を実施する方法の二つである。後者の場合、(2)で特定のスマートシティにおける世帯要因の統計値(平均値)を与えると、各スマートシティの家庭における床面積あたりCO<sub>2</sub>排出量が推算されるので、これにそのスマートシティにおける住宅の平均床面積を乗ずると、1世帯あたりのCO<sub>2</sub>排出量が推算できる。なお、1世帯あたりのCO<sub>2</sub>排出量そのものを被説明変数とするときには、住宅の床面積を独立変数の一つとして採用する。

また自動車による1世帯あたりCO<sub>2</sub>排出量の推算については、ヘックマンの2段階推定モデルを用いて、1段階目に全サンプルに対して自動車の保有の有無を、2段階目に自動車保有世帯を対象として自動車による1世帯あたりCO<sub>2</sub>排出量を被説明変数とする回帰分析を実施した。これは自動車を保有しない世帯をサンプルから除いた場合に起こりうる次のようなバイアスを回避するためである。東京23区などの公共交通が至便で、家庭が自動車を保有する必要性が少ないと考えられる地域において自動車を保有する世帯は、何らかのやむを得ない必要性があって自動車を保有している可能性が高い。したがってそのような地域で、自動車を保有しない世帯を除外したサンプルで回帰分析を実施すると、何らかの特殊事情を反映した結果となる可能性がある。そこで、全サンプルを推定の対象とするヘックマンの2段階推定モデルを採用した。

## 3. 回帰分析

### 3.1 回帰係数の推定

(1)式は住宅によるCO<sub>2</sub>排出量を被説明変数としたときの回帰式である。

$$\ln y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad k = 38 \text{ or } 39 \quad (1)$$

$y$  は1世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量 kg-CO<sub>2</sub>/(月・世帯) または床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量 kg-CO<sub>2</sub>/(月・㎡)である。 $y$  を世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量とするときには家庭CO<sub>2</sub>調査結果の全データを住宅の建て方(戸建て・集合)別に分割した2つのサブサンプルに対して、 $y$  を床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量とするときには、全データを住宅の建て方(戸建て・集合)別、住宅床面積6区分別に分割した12個のサブサンプルに対して、(1)式の重回帰式の係数を推定した。戸建て・集合の住宅床面積6区分は、松岡ら<sup>5)</sup>の区分に従っている。

表2 変数の定義 (住宅)

| 変数          | 定義  |
|-------------|---|
| $y$         | 世帯当たりCO <sub>2</sub> 排出量 または 床面積当たりCO <sub>2</sub> 排出量<br>kg-CO <sub>2</sub> /(月・世帯)または kg-CO <sub>2</sub> /(月・㎡) |
| $x_1$       | 世帯人員<br>人   |
| $x_2$       | 世帯主年齢<br>4.5, 14.5, 24.5, 34.5, 44.5, 54.5, 62, 69.5, 80 歳  |
| $x_3$       | 未成年(20歳未満)の世帯員ダミー<br>あり=1, なし=0   |
| $x_4$       | 65歳以上の世帯員ダミー<br>あり=1, なし=0  |
| $x_5$       | 世帯年収(対数値)<br>125万円, 375万円, 625万円, 875万円, 1250万円, 1750万円   |
| $x_{6-9}$   | 建築時期(基準: 1980年以前)<br>1980年以前, 1981年から1990年, 1991年から2000年, 2001年から2010年, 2011年以降                                   |
| $x_{10-12}$ | 平日の在宅時間(基準: ほぼ毎日)<br>ほぼ毎日, 週3-4日, 週1-2日, ほとんどいない  |
| $x_{13}$    | 冷蔵庫の購入時期<br>2011以降=1, 2011以前=0  |
| $x_{14}$    | エアコンの購入時期<br>2011以降=1, 2011以前=0   |
| $x_{15}$    | 居間の照明にLEDがある/ない<br>あり=1, なし=0   |
| $x_{16}$    | エアコンの設定温度<br>℃  |
| $x_{17}$    | エアコンの平日のおおよその使用時間(8月頃)<br>24時間=100%, 20~24時間=91.67%, ~, 2~4時間=12.5%, 0~2時間=4.17%                                  |
| $x_{18}$    | 省エネ行動実施率(実施数/12項目*)<br>%  |
| $x_{19-25}$ | 地域ダミー(基準: 6地域)<br>建築物省エネルギー基準の地域(1~8)   |
| $x_{26-36}$ | 月次ダミー(基準: 6月)   |
| $x_{37}$    | 太陽光発電の使用ダミー<br>あり=1, なし=0   |
| $x_{38}$    | 電気ヒートポンプ式給湯器・電気温水器の使用ダミー<br>あり=1, なし=0  |
| $x_{39}$    | 床面積**<br>㎡ (世帯当たりCO <sub>2</sub> 推定のみ)  |

\*家庭CO<sub>2</sub>統計夏季調査票の家電の使い方に関する12の質問のうち「実施している」項目数の比率

\*\*被説明変数を世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量とするときにのみ使用

表2に(1)式における変数の定義を示す。説明変数は鷲

津・中野<sup>4)</sup>に用いたものに、太陽光発電の使用ダミーと電気ヒートポンプ式給湯器・電気温水器の使用ダミーを加えた。鷺津・中野<sup>4)</sup>で用いた説明変数は、世帯人員、世帯主年齢、老人や子供の有無、世帯収入の一般的な世帯属性に加え、住宅や設備の性能、住まい手の省エネ意識に関する変数、省エネ基準の変更時期と大まかに対応している建築時期区分ダミー、平日の在宅時間、冷蔵庫やエアコンの購入時期、LED電球の導入状況である。最後の3つの項目については、Nakano and Washizu<sup>6)</sup>において、電力消費に大きな影響を与えると考えられたことから説明変数として採用した。そのほか、地域ダミーを、建築物省エネルギー基準の8地域区分で加えている。太陽光発電の使用ダミーと電気ヒートポンプ式給湯器・電気温水器の使用ダミーを新たに追加したのは、新富ら<sup>7)</sup>のCO<sub>2</sub>排出要因を説明変数とした世帯のクラスタリング分析において、住宅の太陽光発電利用とオール電化が、クラスターを特徴づける要因とされていたからである。家庭CO<sub>2</sub>統計ではオール電化住宅かどうかについては調査されていないので、オール電化住宅では電気ヒートポンプ式給湯器・電気温水器を使うと考え、これらの機器の使用ダミーをオール電化の有無の代理変数とした。

(2)式と(3)式は自動車による1世帯あたりCO<sub>2</sub>排出量の推算に用いた、ヘックマンの2段階推定モデルの推定式である。

$$1 \text{ 段階目} : d = \alpha_0 + \sum_{i=1}^8 \alpha_i x_i \quad (2)$$

$$2 \text{ 段階目} : y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{25} \beta_i x_i \quad (3)$$

ただし  $d$  は自動車の保有ありの時1、保有無しの時0であるようなダミー変数である。ヘックマンの第1段階の推定はプロビットモデルである。 $d$  の推定値を標準正規分布関数に代入することで、自動車の保有確率を求めることができる。また、 $y$  は世帯当たり自動車によるCO<sub>2</sub>排出量kg-CO<sub>2</sub>/(月・世帯)である。表3に(2)(3)式における変数の定義を示す。表中\*印は(2)式の説明変数としても使用した変数であることを示す。この場合も説明変数には、世帯人員、世帯主年齢、老人や子供の有無、世帯収入の一般的な世帯属性を採用している。それに加え、自動車保有台数、自動車1台当たり年間走行距離(対数値)、最寄りの駅まで2000m以内に立地している住宅割合、電気自動車ダミー、プラグインハイブリッド車ダミー、自動車に関する省エネ行動実施の有無、大都市ダミー(東京都23区、大阪市)を加えた。このうち、最寄りの駅まで2000m以内の住宅割合を説明変数として採用したのは、この変数が、国土交通省<sup>viii)</sup>において、自動車利用を含めた人の動きに重要な影響を及ぼすと指摘されているからである。駅まで2000m以内の住宅割

合は、2018年の住宅・土地統計調査において4桁の地域コード別に計算される割合を、住所情報をもとに家庭CO<sub>2</sub>統計の個票データに結び付けて使用した。大都市ダミーを採用したのは、星野・森田<sup>8,9)</sup>で、東京都23区と大阪市における自動車利用状況の特殊性が指摘されていたからである。

表3 変数の定義(自動車)

| 変数              | 定義   |
|-----------------|--|
| $y$             | 世帯当たりCO <sub>2</sub> 排出量(自動車)<br>kg-CO <sub>2</sub> /(月・世帯)        |
| $d$             | 自動車保有ダミー   |
| $x_1$           | 世帯人員*<br>人   |
| $x_2$           | 世帯主年齢*<br>4.5, 14.5, 24.5, 34.5, 44.5, 54.5, 62, 69.5, 80歳         |
| $x_3$           | 未成年(20歳未満)の世帯員ダミー*<br>あり=1, なし=0                                   |
| $x_4$           | 65歳以上の世帯員ダミー*<br>あり=1, なし=0  |
| $x_5$           | 世帯年収(対数値)*<br>125万円, 375万円, 625万円, 875万円, 1250万円, 1750万円           |
| $x_6$           | 自動車保有台数<br>台   |
| $x_7$           | 自動車1台当たり年間走行距離(対数値)<br>km/台  |
| $x_8$           | 駅から2000m以内の住宅割合*   |
| $x_9$           | 電気自動車ダミー<br>あり=1, なし=0   |
| $x_{10}$        | プラグインハイブリッド車ダミー<br>あり=1, なし=0                                      |
| $x_{11}$        | 省エネ行動実施(自動車)<br>実施=1, 実施なし=0                                       |
| $x_{12\sim 13}$ | 大都市ダミー(基準: 東京都23区でも大阪市でもない地域)*<br>東京23区=1, それ以外=0<br>大阪市=1, それ以外=0 |
| $x_{14\sim 24}$ | 月次ダミー(基準: 6月)  |

\*は1段階目の自動車保有の有無に関する回帰分析の説明変数として使用した変数であることを示す。

### 3.2 スマートシティ別世帯要因の統計値の推計

本研究では、表1のスマートシティプロジェクトのうち、スマートシティの実現に向けて最も総合的な取り組みを実施している、国土交通省のスマートシティモデル事業に着目する。同プロジェクトで、令和元年度に選定された先行モデルプロジェクトのうち、市・町の全域をプロジェクト対象としている表4の6つの市と町を例にとり、各地域の典型的な家庭の、1世帯・1年あたり住宅と自動車によるCO<sub>2</sub>排出量を試算して比較する。表4は、これらの市と町の家によるCO<sub>2</sub>排出量を推算するために、(1)~(3)式で推定された回帰係数に乗じた説明変数の統計値をその出典とともに示す。国勢調査、全国家計構造調査、住宅・土地統計調査は比較的小規模の行政区分単位で集計されているので、これらの変数によって、それらの地域の家庭によるCO<sub>2</sub>排出量を特徴づけることが可能である。他の政府統計では

捕捉されていない住宅や設備の性能、住まい手の省エネ意識に関する変数については、家庭 CO<sub>2</sub> 統計の住宅の建て方(戸建て・集合)別、住宅床面積 6 区分別の 12 個のデータセットをさらに建築物省エネルギー基準における 8 つの地域別に分割した 96 の分析区分の平均値のうち、それぞれのスマートシティに対応する分析区分の値を当てはめた。なお、本研究成果を特定地域の効果検証に应用する場合、その地域についてこれらの変数を直接調査したり、当該地域の自治体から情報提供の協力を得られたりすれば、推算の精度を高めることができる。

### 3.3 スマートシティ実証地域別 1 世帯当たり年間 CO<sub>2</sub> 排出量の推算

$r$  番目のスマートシティ実証地域における住宅による 1 世帯・1 カ月当たり CO<sub>2</sub> 排出量 kg-CO<sub>2</sub>/(月・世帯)  $\hat{y}_r$  または 1 世帯・1 カ月・床面積当たり CO<sub>2</sub> 排出量  $\hat{y}'_r$  (kg-CO<sub>2</sub>/(月・m<sup>2</sup>)) を(4)または(5)式によって推算する。

$$\ln \hat{y}_r = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^{18} \hat{\beta}_i \bar{x}_{i,r} + \sum_{j=19}^{25} \hat{\beta}_j \bar{x}_{j,r} + \frac{1}{12} \sum_{k=26}^{36} \hat{\beta}_k + \sum_{m=37}^{39} \hat{\beta}_m \bar{x}_{m,r} \quad (4)$$

$$\ln \hat{y}'_r = \hat{\beta}'_0 + \sum_{i=1}^{18} \hat{\beta}'_i \bar{x}_{i,r} + \sum_{j=19}^{25} \hat{\beta}'_j \bar{x}_{j,r} + \frac{1}{12} \sum_{k=26}^{36} \hat{\beta}'_k + \sum_{m=37}^{38} \hat{\beta}'_m \bar{x}_{m,r} \quad (5)$$

(4)式の $\hat{\beta}_*$ は 1 世帯・1 カ月当たり CO<sub>2</sub> 排出量を被説明変数とするときの(1)式を、家庭 CO<sub>2</sub> 調査結果の全データで推定したときの  $\beta_*$  の推定値である。また(5)式の $\hat{\beta}'_*$ は 1 世帯・1 カ月・床面積当たり CO<sub>2</sub> 排出量を被説明変数とするときの(1)式を、住宅の建て方(戸建て・集合)別、住宅床面積

6 区分別の 12 個のデータセットのうち、 $r$  番目の市区町村が含まれるデータセットで推定したときの  $\beta_{*,r}$  の推定値である。 $\bar{x}_{i,r}$  と  $\bar{x}_{m,r}$  は、前項で説明した、説明変数の  $r$  番目の市区町村についての平均値、 $\bar{x}_{j,r}$  は第  $j-18$  番目の建築物省エネルギー基準の地域区分が  $r$  番目の市区町村を含むときに 1、そうでないときに 0 となる値である。(4)または(5)式の 4 番目の項は、月別効果を平均して 1 月あたり CO<sub>2</sub> 排出量の年平均値としている。(4)式の 1 カ月当たり CO<sub>2</sub> 排出量の年平均値を 12 倍することで、各スマートシティ実証地域の家庭の年間 1 世帯当たり CO<sub>2</sub> 排出量  $T_r$  (t-CO<sub>2</sub>/(年・世帯)) または、年間 1 世帯・床面積当たり CO<sub>2</sub> 排出量  $t_r$  (t-CO<sub>2</sub>/(年・m<sup>2</sup>)) を推算する。後者は  $r$  番目のスマートシティ実証地域に観測される住宅の平均面積  $S_r$  を乗ずることで、年間 1 世帯当たり CO<sub>2</sub> 排出量  $T'_r$  (t-CO<sub>2</sub>/(年・世帯)) を(5)式のように推算する。

$$T'_r = t_r \cdot S_r \quad (6)$$

結果として、同じスマートシティ実証地域  $r$  に対して  $T_r$  と  $T'_r$  はが推算されるので、両者を比較する。

同様に(2)、(3)式を家庭 CO<sub>2</sub> 調査結果の全データで推定したときの係数の推定結果を用いて、 $r$  番目のスマートシティ実証地域における自動車の保有確率および自動車による 1 世帯当たり・1 カ月 CO<sub>2</sub> 排出量 kg-CO<sub>2</sub>/(月・世帯) を(6)、(7)式によって推算する。

$$1 \text{ 段階目} : \hat{a}_r = \hat{a}_0 + \sum_{i=1}^8 \hat{a}_i \bar{x}_{i,r} \quad (6)$$

$$2 \text{ 段階目} : \hat{y}_r = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^{25} \hat{\beta}_i \bar{x}_{i,r} \quad (7)$$

表 4 1 世帯・1 年あたり住宅と自動車による CO<sub>2</sub> 排出量の推算のための統計値

| 建築基準法地域区分           | 3                 | 5           | 5           | 5           | 6          | 5          | 出典                                     |
|---------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|--|
|                     | 秋田県<br>仙北市        | 茨城県<br>つくば市 | 栃木県<br>宇都宮市 | 埼玉県<br>毛呂山町 | 静岡県<br>藤枝市 | 島根県<br>益田市 |  |
| 1 世帯あたり人員           | 2.79              | 2.28        | 2.35        | 2.25        | 2.71       | 2.42       | 2015 年国勢調査                             |
| 世帯主年齢**             | 60.47             | 48.23       | 52.93       | 54.91       | 56.67      | 58.76      |  |
| 20 歳未満世帯員のいる割合      | 0.23              | 0.27        | 0.26        | 0.21        | 0.29       | 0.22       |  |
| 65 歳以上世帯員のいる割合      | 0.68              | 0.26        | 0.36        | 0.43        | 0.48       | 0.55       |  |
| 世帯年収(万円)*           | 602.99            | 693.86      | 640.99      | 664.25      | 641.81     | 630.72     | 2019 年全国家計構造調査                         |
| 建築時期構成比(一戸建て)       | -1980<br>0.48     | 0.19        | 0.25        | 0.23        | 0.27       | 0.46       |  |
|                     | 1981-1990<br>0.17 | 0.20        | 0.18        | 0.33        | 0.19       | 0.20       |  |
|                     | 1990-2000<br>0.16 | 0.19        | 0.17        | 0.19        | 0.19       | 0.15       |  |
|                     | 2000-2010<br>0.12 | 0.22        | 0.22        | 0.16        | 0.18       | 0.11       |  |
|                     | 2011-<br>0.07     | 0.19        | 0.18        | 0.07        | 0.17       | 0.08       |  |
| 建築時期構成比(共同住宅)       | -1980<br>0.27     | 0.02        | 0.05        | 0.08        | 0.05       | 0.06       |  |
|                     | 1981-1990<br>0.10 | 0.21        | 0.19        | 0.23        | 0.09       | 0.27       |  |
|                     | 1990-2000<br>0.31 | 0.28        | 0.27        | 0.30        | 0.40       | 0.25       |  |
|                     | 2000-2010<br>0.28 | 0.33        | 0.31        | 0.22        | 0.29       | 0.23       |  |
|                     | -2011<br>0.04     | 0.15        | 0.19        | 0.16        | 0.17       | 0.19       |  |
| 住宅面積 m <sup>2</sup> | 一戸建て*<br>151.82   | 128.18      | 128.05      | 113.43      | 128.50     | 151.28     |  |
|                     | 共同住宅*<br>43.89    | 48.27       | 47.20       | 52.81       | 48.51      | 46.45      |  |
| 自動車保有台数*            | 1.38              | 1.58        | 1.59        | 0.96        | 1.39       | 1.40       | 自動車検査登録情報協会 2020 年 3 月                 |
| 駅まで 2km 以内の住宅割合     | 0.55              | 0.25        | 0.48        | 0.87        | 0.32       | 0.42       |  |
| 保有台数割合              | 電気自動車*            | 0.20%       | 0.16%       | 0.16%       | 0.19%      | 0.25%      | 次世代自動車振興センター 都道府県別補助金交付台数 2009~2019 累計 |
|                     | プラグインハイブリッド車*     | 0.12%       | 0.14%       | 0.14%       | 0.17%      | 0.14%      |  |

$\hat{a}_r$ を標準正規分布関数に代入することで、 $r$  番目のスマートシティ実証地域における自動車の保有確率が推算できる。

表5 地域別自家用車の1台あたり年間走行距離

|      | 駅まで2kmの住居割合         | km/台・年 |
|------|---------------------|--------|
| 第1分位 | 0~0.4571707         | 6,708  |
| 第2分位 | 0.4571707~0.6358001 | 6,639  |
| 第3分位 | 0.6358001~0.8229341 | 5,995  |
| 第4分位 | 0.8229341~1         | 4,835  |

なお、家庭CO<sub>2</sub>統計の個票データに結び付けられている、各住所地域の「最寄りの駅まで2000m以内に立地している住宅割合」のデータを、4分位に分け、それぞれのグループに対して、家庭CO<sub>2</sub>統計で捕捉されている自家用車の1台あたり年間走行距離を計算した。表5はその結果である。駅まで2000m以内の住宅割合が多い地域ほど、自家用車の1台あたり年間走行距離が短くなる傾向が示されている。そして、各スマートシティ実証地域における駅まで2000m以内の住宅割合(表4参照)が含まれるグループの1台あたり年間走行距離を対数にして、(7)式の $\bar{x}_r$ に当てはめた。

## 4. 結果

### 4.1 回帰分析の結果

前節で説明した(1)~(3)式の係数を推定した結果を付表1および付表2に示す。なお、1世帯・1カ月・床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量を被説明変数とするときの(1)式を、住宅の建て方(戸建て・集合)別、住宅床面積6区分別の12個のデータセットに当てはめて推定した結果については、そのうちの表4の市と町の排出量を計算するのに必要な3本の回帰式の係数だけが示されている。すべての回帰式の推定結果は鷺津・中野<sup>10)</sup>を参照されたい。

鷺津・中野<sup>4)</sup>の1次エネルギー消費原単位についての結果と同様に、付表によれば、ほとんどの回帰係数は有意水準1%で有意に推定されている。付表1で、住宅の床面積当たりまたは世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量に対して、世帯人員数や世帯主年齢は正の効果があり、冷蔵庫やエアコンの購入時期が新しいことや夏季のエアコンの設定温度が高いこと、省エネ行動達成率が高いことは負の効果を持つ。エアコンの使用時間が長いこと、建築物省エネルギー基準における地域区分が6地域よりも寒冷な1~5地域であることは正の効果を持つ。反対に6地域に対して温暖な8地域であることもCO<sub>2</sub>排出量の増加要因である。建物の建築時期について1980年以前に対して新しいことは、戸建て住宅については負の効果を持つが、集合住宅については新しい方が、CO<sub>2</sub>排出量が大きくなる傾向がある。月別ダミーにかかる回帰係数をみると、6月と比較した場合、3、4、7月にCO<sub>2</sub>排

出量が低くなり、それ以外の月では高くなるという傾向があり、これも鷺津・中野<sup>4)</sup>の平成29年度の状況と一致している。戸建てにおける太陽光発電の使用はCO<sub>2</sub>排出量を減らす、戸建て・集合とも電気ヒートポンプ式給湯器・電気温水器の使用はCO<sub>2</sub>排出量を増やすという結果である。戸建ての場合に、居間のLED省エネダミーもCO<sub>2</sub>排出の増加要因になる場合がある。

付表2で自動車についての分析結果を見ると、まず1段階目の自動車の保有選択に正の影響を持つのは世帯人員数、世帯主年齢、世帯収入である。未成年や高齢者が世帯にいる場合、駅まで2000m以内の住宅割合が高い地域に住んでいる場合、東京23区や大阪市に住んでいる場合には、自動車の保有確率が低くなる傾向を示す。2段階目の1世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量に正の効果をもたらすのは世帯人員数、世帯主年齢、世帯収入、自動車保有台数、1台あたり年間走行距離である。未成年が世帯にいる場合にはCO<sub>2</sub>排出量が増え、高齢者が世帯にいる場合には減るという結果である。駅まで2000m以内の住宅割合が高い地域に住んでいる、電気自動車やプラグインハイブリッド車、省エネ運転をしている、東京23区や大阪市に住んでいる場合には、CO<sub>2</sub>排出量が少なくなる。月別には6月に対して4・5・9月にCO<sub>2</sub>排出が多くなり、他の月では小さくなる。未成年が家族にすることは、自動車の保有確率を下げる要因になる一方で、自動車を持っている場合には、CO<sub>2</sub>排出量を増やす要因になるという対比が興味深い。

表6 回帰式の再現性

| 被説明変数                     | 面積区分                    | 地域                     | 推算値 | 観測値    | 乖離率    |        |        |       |
|---------------------------|-------------------------|------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|-------|
| 戸建て                       | 床面積当たり排出量 <sup>a)</sup> | 100~120 m <sup>2</sup> | 5   | 2.57   | 2.85   | -9.8%  |        |       |
|                           |                         | 120~150 m <sup>2</sup> | 3   | 2.64   | 3.19   | -17.4% |        |       |
|                           |                         |                        | 5   | 2.28   | 2.58   | -11.7% |        |       |
|                           | 世帯当たり排出量 <sup>b)</sup>  | 全平均                    | 6   | 1.90   | 2.22   | -14.4% |        |       |
|                           |                         |                        | 3   | 332.82 | 341.94 | -2.7%  |        |       |
|                           |                         |                        | 5   | 275.37 | 288.16 | -4.4%  |        |       |
| 集合                        | 床面積当たり排出量 <sup>a)</sup> | 40~60 m <sup>2</sup>   | 6   | 236.95 | 242.56 | -2.3%  |        |       |
|                           |                         |                        | 3   | 4.56   | 4.42   | 3.1%   |        |       |
|                           |                         |                        | 5   | 3.45   | 4.07   | -15.2% |        |       |
|                           | 世帯当たり排出量 <sup>b)</sup>  | 全平均                    | 6   | 2.86   | 3.49   | -18.0% |        |       |
|                           |                         |                        | 3   | 211.47 | 162.01 | 30.5%  |        |       |
|                           |                         |                        | 5   | 172.96 | 162.61 | 6.4%   |        |       |
| 自動車世帯当たり排出量 <sup>b)</sup> |                         |                        | 6   | 168.82 | 155.47 | 8.6%   |        |       |
|                           |                         |                        |     |        |        | 146.94 | 160.49 | -8.4% |

注1)「地域」は建築基準法の地域区分を示す。

注2) 地域区分5に分類されるスマートシティ実証地域のうち毛呂山町だけが、戸建て住宅の平均値が100~120 m<sup>2</sup>に該当する。

注3) 被説明変数の単位 a)CO<sub>2</sub>-kg/m<sup>2</sup>・月 b)CO<sub>2</sub>-kg/世帯・月

推定された回帰式の再現性を表6で検討する。表6では、付表1の5本の回帰式に対象とする6つのスマートシティ実証地域の建築基準法地域区分に該当する、家庭CO<sub>2</sub>調査のそれぞれの説明変数の平均値を当てはめて推算した被説明変数の「推算値」を、家庭CO<sub>2</sub>調査で観測された対応する平均値と比較している(対数での推算値は真数に変換して

表7 スマートシティ実証地域の1世帯当たり年間CO<sub>2</sub>排出量の推算結果(CO<sub>2</sub>-t/世帯・年)

|     |      | 住宅      |      |      |         |      |      | 自動車  |      |
|-----|------|---------|------|------|---------|------|------|------|------|
|     |      | 戸建て     |      |      | 集合      |      |      |      | 保有確率 |
|     |      | 面積原単位推計 | 世帯推計 |      | 面積原単位推計 | 世帯推計 |      |      |      |
| A   | B    | A/B     | A    | B    | A/B     |      |      |      |      |
| 秋田県 | 仙北市  | 5.07    | 4.56 | 1.11 | 2.72    | 2.90 | 0.94 | 1.65 | 0.93 |
| 茨城県 | つくば市 | 3.06    | 3.05 | 1.00 | 2.03    | 2.02 | 1.01 | 1.99 | 0.96 |
| 栃木県 | 宇都宮市 | 3.12    | 3.13 | 1.00 | 2.04    | 2.07 | 0.99 | 1.86 | 0.92 |
| 埼玉県 | 毛呂山町 | 3.35    | 3.08 | 1.09 | 2.23    | 2.08 | 1.07 | 0.93 | 0.81 |
| 静岡県 | 藤枝市  | 2.86    | 2.94 | 0.97 | 1.88    | 2.09 | 0.90 | 1.83 | 0.96 |
| 島根県 | 益田市  | 3.89    | 3.46 | 1.13 | 2.04    | 2.13 | 0.96 | 1.71 | 0.94 |

いる)。また自動車については、付表2の回帰式に、家庭CO<sub>2</sub>調査の説明変数の全平均値を当てはめた推算値を、観測された平均値と比較している。戸建て、集合とも面積によって区分せず、世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量を推計した結果の方が、当てはまりがよさそうである。ただし地域区分3の集合住宅については、面積によって区分し住宅の床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量を計算した場合の方が、当てはまりが良い。概して世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量を推計した結果の方が当てはまりは良いが、地方の集合住宅という比較的観測数が限られるケースに対しては、推算の精度が悪くなると推察される。

#### 4.2 スマートシティ実証地域の1世帯当たり年間CO<sub>2</sub>排出量の推算結果

付表1と2の回帰係数に3.2節で説明した6つのスマートシティ実証地域に関する説明変数の平均値を当てはめて推算した、それぞれの地域における家庭の1世帯当たり年間CO<sub>2</sub>排出量の推算結果(CO<sub>2</sub>-t/世帯・年)を表7に示す。

住宅については、床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量を回帰式から推算して、各スマートシティ実証地域の平均住宅床面積を乗ずることで1世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量を推算した結果(面積原単位推計)と、世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量を回帰式から推算した結果(世帯推計)とを比較している。戸建てについては、仙北市と益田市で、両者の乖離が大きくなっているがこれは住宅の床面積がこの2つのスマートシティ実証地域で特に大きく(表4参照)、床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量の推算結果に平均住宅床面積を乗じた場合(面積原単位推計)に床面積の効果がより大きく表れるからである。今後の研究では、本研究成果を応用して、スマートシティプロジェクトで実施される住宅用エネルギーマネジメントシステムの導入の影響評価を実施したい。その際、工学的なモデル分析から導出される省エネ効果を、表7の推算値に当てはめることで、スマートシティ全体のCO<sub>2</sub>削減効果を評価することを考えている。そのような場合にどちらの推計方法を用いるかについて、分析対象地域の住宅の床面積分布を考慮した注意深い検討が必要といえそうである。床面積と地域ダミーの他に、世帯別CO<sub>2</sub>排出量の推算結果に大きく影響して

いるのは世帯人員と世帯主年齢である。集合については、面積原単位推計の方がCO<sub>2</sub>排出量の推算結果が低めとなっているが、これはここに取り上げたスマートシティ実証地域における集合住宅の平均床面積が小さめ(40~60m<sup>2</sup>)であることが原因である。また面積別に分析を実施した集合住宅の床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量を被説明変数とする回帰分析の結果を見ると(付表1)、必ずしも住宅の建築年が新しい方が、CO<sub>2</sub>排出量が少ないというわけではなく、1980年以前と比べ1980年~2000年までの建物である方が、CO<sub>2</sub>排出量が少ない、という結果になっている。その結果としてこの時期に建築された建物の割合が相対的に多い藤枝市において、面積原単位推計によるCO<sub>2</sub>排出量が少なめに推算されている。自動車の1世帯当たり年間CO<sub>2</sub>排出量及び保有確率について、スマートシティ実証地域間の相違に最も大きな影響を持つ要因は、最寄りの駅まで2000m以内に立地している住宅の割合である。

#### 5. まとめ

現在日本各地のあらゆるレベルの自治体で、ICT等の新技術を活用し、住宅のエネルギー消費やモビリティのマネジメントを高度化して、諸課題の解決を行うというスマートシティプロジェクトが展開されている。そのようなプロセスにおいて事業がもたらすエネルギー・環境効果のアセスメントは重要である。一方、家庭CO<sub>2</sub>統計は、家庭のエネルギー消費に伴うCO<sub>2</sub>排出実態を、家庭の社会的な世帯属性およびその背景となる技術条件とともに調査している貴重なデータベースである。ただし、標本調査であるため、必ずしも捕捉したい自治体の情報が入手できるとは限らない。

そこで、本研究では、鷺津・中野<sup>4)</sup>が開発した推定手法を応用して、スマートシティプロジェクト等に取り組むどの地域に対しても、1世帯当たりの家庭CO<sub>2</sub>排出量(住宅および自動車によるエネルギー消費を起源とするもの)を推算するための手法開発を行った。具体的には、まず、平成30年度家庭CO<sub>2</sub>調査のマイクロデータを用いて、各世帯の住宅または自動車によるCO<sub>2</sub>排出量を被説明変数、それに

影響する世帯要因を説明変数とする回帰分析を実施して回帰係数を推定し、これに特定のスマートシティ実証地域における世帯要因の統計値(平均値)を与えて、各スマートシティ実証地域の1世帯あたりCO<sub>2</sub>排出量を推算した。

住宅によるCO<sub>2</sub>排出量については、床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量を回帰式から推算して、各スマートシティ実証地域の平均住宅床面積を乗ずることで1世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量を推算する方法と、世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量を回帰式から推算する方法とを比較した。後者の方がデータの再現性が良く、前者の方が特定地域の住宅面積の影響を受けやすいことが分かった。住宅によるCO<sub>2</sub>排出の場合、地域間の相違を特徴づける要因は、世帯人員と世帯主年齢、住宅の床面積であった。自動車によるCO<sub>2</sub>排出量の推定はヘックマンの2段階推定モデルを用いて、全サンプルを対象として、1段階目に自動車保有確率を、2段階目に自動車によるCO<sub>2</sub>排出量を被説明変数とする回帰分析を実施した。その結果大都市ダミーが有意に計測されるなど、地域の違いをよく反映した回帰係数の推定が可能となった。自動車の1世帯当たり年間CO<sub>2</sub>排出量及び保有確率について、地域間の相違に最も大きな影響を持つ要因は、最寄りの駅まで2000m以内に立地している住宅の割合であった。

鷺津・中野<sup>4)</sup>の手法を発展させて、本研究では、エネルギー消費に影響する主要な世帯属性と技術特性から住宅のCO<sub>2</sub>排出量を推定する手法を開発した。通常、世帯主年齢や世帯所得などの代表的な世帯属性情報は、国勢調査等の基幹統計で地域別に詳しく捕捉されている。そうした捕捉しやすい情報を用いることで、家庭CO<sub>2</sub>統計の調査結果を、あらゆるレベルの自治体や特定の地域におけるCO<sub>2</sub>排出量に対しても演繹することができる。

本研究の今後の方向性は、スマートシティ実証地域などで実施されている、エネルギーマネジメントやモビリティマネジメントの具体的な実施効果を調査すること、調査された結果に基づいて、地域ごとに異なるスマートシティの実施効果をアセスメントすること、さらにアセスメントで得られた効果に基づいて、スマートシティの体系化(スマートシティの構築や、完成後のマネジメント、目標に向かうためのマニュアルづくりのための基礎情報として本研究成果発信を行うこと)の2点である。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金(課題番号 21H03676, 19KT0037, 20K22139)、早稲田大学特定課題研究助成費(2021C-263)、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(2-2008)の下で実施した。本研究では、エネルギー・資源学会 家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査利用研究会において利用が認められた平成30年度家庭CO<sub>2</sub>統計マイクロ

データを用いた研究成果である。マイクロデータ利用にあたりご尽力くださった関係各位に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 内閣府『スマートシティガイドブック』2021.  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/smartcity/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/smartcity/index.html) (アクセス日 2021.05.01)
- 2) 山本 尚司『スマートシティの今を考える』日本エネルギー経済研究所, 2018.  
<https://eneken.icej.or.jp/data/7810.pdf> (アクセス日 2021.05.01)
- 3) 小嶋祐輔, 荒井綾希子, 阿部力也, 岩船由美子『電気自動車・蓄電池を用いた戸建て住宅地域の電力融通システムの設計方法の確立およびその評価』エネルギー・資源学会論文誌, 42(2), 50-57, 2021.
- 4) 鷺津明由, 中野諭『社会統計に基づく住宅のエネルギー消費原単位の推計』エネルギー・資源学会論文誌, 41(6), 282-289, 2020.
- 5) 松岡綾子, 杉山みなみ, 桃木貴志, 山口容平, 下田吉之「長期エネルギー需給見通しにおける家庭部門CO<sub>2</sub>排出削減見込み量の検証」日本建築学会環境系論文集 84(757), 323-333, 2019.
- 6) Nakano, S., Washizu, A “In Which Time Slots Can People Save Power? An Analysis Using a Japanese Survey on Time Use,” Sustainability, 11(16), 4444, 1-19, 2019
- 7) 新富凌汰, 大竹宏明, 井上裕史『家庭CO<sub>2</sub>統計に基づくCO<sub>2</sub>排出要因による世帯類型化』第39回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, 366-371, 2020.
- 8) 星野優子, 森田圭『自家用車の保有状況と走行距離に関する個票データを用いた家庭部門の輸送需要の長期予測』第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 578-584, 2021.
- 9) 星野優子, 森田圭『人口減少に着目した家庭の自家用車による輸送需要の将来推計』第39回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, 578-584, 2020.
- 10) 鷺津明由, 中野諭 (2020) 「スマートシティの効果分析のための家庭による住宅と自動車のCO<sub>2</sub>排出量原単位の作成: 環境省・平成30年度家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査を用いた分析」, 早稲田大学 先端社会科学研究所ワーキングペーパー, 近刊

(注)

- i) スマートシティ官民連携プラットフォーム  
<https://www.mlit.go.jp/scpf/index.htm> (アクセス日 2021.05.01)
- ii) 内閣府「SIPアーキテクチャ構築及び実証研究」



|                           |         |     |          |     |         |     |         |     |         |     |
|---------------------------|---------|-----|----------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
| 5月                        | 0.073   |     | 0.068    |     | 0.098   |     | 0.077   |     | 0.093   |     |
|                           | (0.019) | *** | (0.019)  | *** | (0.022) | *** | (0.011) | *** | (0.013) | *** |
| 7月                        | -0.101  |     | -0.076   |     | -0.157  |     | -0.097  |     | -0.164  |     |
|                           | (0.020) | *** | (0.019)  | *** | (0.023) | *** | (0.011) | *** | (0.013) | *** |
| 8月                        | 0.102   |     | 0.113    |     | -0.068  |     | 0.091   |     | -0.080  |     |
|                           | (0.020) | *** | (0.019)  | *** | (0.024) | *** | (0.011) | *** | (0.013) | *** |
| 9月                        | 0.432   |     | 0.455    |     | 0.153   |     | 0.415   |     | 0.138   |     |
|                           | (0.021) | *** | (0.019)  | *** | (0.025) | *** | (0.011) | *** | (0.014) | *** |
| 10月                       | 0.727   |     | 0.784    |     | 0.413   |     | 0.724   |     | 0.430   |     |
|                           | (0.021) | *** | (0.018)  | *** | (0.025) | *** | (0.011) | *** | (0.014) | *** |
| 11月                       | 0.639   |     | 0.677    |     | 0.349   |     | 0.624   |     | 0.366   |     |
|                           | (0.020) | *** | (0.019)  | *** | (0.025) | *** | (0.011) | *** | (0.014) | *** |
| 12月                       | 0.446   |     | 0.477    |     | 0.212   |     | 0.433   |     | 0.225   |     |
|                           | (0.021) | *** | (0.019)  | *** | (0.024) | *** | (0.011) | *** | (0.014) | *** |
| 太陽光発電の使用                  | -0.236  |     | -0.247   |     |         |     | -0.252  |     | 0.101   |     |
|                           | (0.012) | *** | (0.010)  | *** |         |     | (0.007) | *** | (0.111) |     |
| 電気ヒートポンプ式給湯器・<br>電気温水器の使用 | (0.173) |     | (0.155)  |     | (0.137) |     | 0.189   |     | 0.233   |     |
|                           | (0.009) | *** | (0.008)  | *** | (0.022) | *** | (0.005) | *** | (0.011) | *** |
| 床面積                       |         |     |          |     |         |     | 0.002   |     | 0.004   |     |
|                           |         |     |          |     |         |     | (0.000) | *** | (0.000) | *** |
| 定数項                       | (0.273) |     | -(0.365) |     | (1.536) |     | 4.711   |     | 4.787   |     |
|                           | (0.110) | **  | (0.099)  | *** | (0.121) | *** | (0.058) | *** | (0.065) | *** |
| 観測数                       | 11004   |     | 14760    |     | 8040    |     | 38220   |     | 23952   |     |
| 自由度調整済み決定係数               | 0.458   |     | 0.454    |     | 0.405   |     | 0.468   |     | 0.484   |     |

括弧内は標準誤差, \*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

付表2 スマートシティの自動車による1世帯当たりCO<sub>2</sub>排出量の推算に用いる回帰係数

|                             |         | CO <sub>2</sub> 排出量(自動車) |     | 自動車保有選択 |     |
|-----------------------------|---------|--------------------------|-----|---------|-----|
| 世帯人員数                       |         | 11.822                   |     | 0.384   |     |
|                             |         | (0.688)                  | *** | (0.007) | *** |
| 世帯主年齢                       |         | 0.053                    |     | 0.005   |     |
|                             |         | (0.050)                  |     | (0.001) | *** |
| 未成年(20歳未満)の世帯員ダミー           |         | 21.365                   |     | -0.219  |     |
|                             |         | (1.408)                  | *** | (0.020) | *** |
| 65歳以上の世帯員ダミー                |         | -14.967                  |     | -0.179  |     |
|                             |         | (1.248)                  | *** | (0.016) | *** |
| 世帯収入(対数値)                   |         | 15.445                   |     | 0.404   |     |
|                             |         | (1.013)                  | *** | (0.008) | *** |
| 自動車保有台数                     |         | 67.371                   |     |         |     |
|                             |         | (0.597)                  | *** |         |     |
| 自動車1台当たり年間走行距離(対数値)         |         | 50.993                   |     |         |     |
|                             |         | (0.497)                  | *** |         |     |
| 駅まで2000m以内の住宅割合             |         | -42.126                  |     | -1.406  |     |
|                             |         | (2.563)                  | *** | (0.022) | *** |
| 電気自動車ダミー                    |         | -96.146                  |     |         |     |
|                             |         | (4.839)                  | *** |         |     |
| プラグインハイブリッド車ダミー             |         | -28.438                  |     |         |     |
|                             |         | (5.395)                  | *** |         |     |
| 省エネ行動達成率(自動車)               |         | -13.788                  |     |         |     |
|                             |         | (0.957)                  | *** |         |     |
| 都市ダミー(基準:東京都23区でも大阪府でもない地域) | 東京都23区  | -43.656                  |     | -1.237  |     |
|                             |         | (4.812)                  | *** | (0.024) | *** |
|                             | 大阪市     | -47.025                  |     | -0.835  |     |
|                             |         | (4.774)                  | *** | (0.031) | *** |
| 月次ダミー(基準:6月)                | 1月      | -6.480                   |     |         |     |
|                             |         | (1.923)                  | *** |         |     |
|                             | 2月      | -7.644                   |     |         |     |
|                             |         | (1.923)                  | *** |         |     |
|                             | 3月      | -8.993                   |     |         |     |
|                             |         | (1.923)                  | *** |         |     |
|                             | 4月      | 1.296                    |     |         |     |
|                             |         | (1.923)                  |     |         |     |
|                             | 5月      | 12.382                   |     |         |     |
|                             |         | (1.923)                  | *** |         |     |
|                             | 7月      | -5.885                   |     |         |     |
|                             |         | (1.923)                  | *** |         |     |
| 8月                          | -5.709  |                          |     |         |     |
|                             | (1.923) | ***                      |     |         |     |
| 9月                          | 6.179   |                          |     |         |     |
|                             | (1.923) | ***                      |     |         |     |
| 10月                         | -6.413  |                          |     |         |     |
|                             | (1.923) | ***                      |     |         |     |
| 11月                         | -12.028 |                          |     |         |     |
|                             | (1.923) | ***                      |     |         |     |
| 12月                         | -5.565  |                          |     |         |     |
|                             | (1.923) | ***                      |     |         |     |
| 定数項                         |         | -496.930                 |     | -1.564  |     |
|                             |         | (9.139)                  | *** | (0.055) | *** |
| ミルズ比                        |         |                          |     | 57.976  |     |
|                             |         |                          |     | (5.128) | *** |
| 観測数                         |         | 108084                   |     |         |     |
| Wald chi2(24)               |         | 32672.010                | *** |         |     |

括弧内は標準誤差, \*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

# 住宅エネルギー消費の6用途分解と再生可能エネルギー利用量の推定

## Decomposition of Residential Energy Consumption and Estimation of Renewable Energy Usage

田中 昭雄\*  
Akio Tanaka

### Abstract

This study proposes a method that disaggregates whole-house energy consumption data into six end-uses: heating, cooling, cooking, hot water supply, snow melting, and others. About 70% of the energy consumed at home is highly correlated with the climate. The method to propose in this research uses this relationship. This method can correctly disassemble even if the data contains errors. As a result of analyzing the household CO<sub>2</sub> statistics in the method manner, its characteristics could be rationally explained. In this study revealed how the COVID-19 epidemic changed the energy consumption of the house. However, improvements are required to estimate the amount of solar heat and the amount of snow melting energy.

**Keywords:** Residential Energy Use, Energy Demand Disaggregation, Singular Value Decomposition, Renewable Energy,

### 1. はじめに

我が国はパリ協定の目標などを踏まえ 2020 年 10 月「2050 年カーボンニュートラル」宣言を行った。さらに 2021 年 5 月 26 日には改正地球温暖化対策推進法が成立している。今後は非 ZEH 住宅においてもカーボンニュートラルの実現が強く求められると予想され、省エネ診断のツールとしてエネルギー需要分解ツールの開発が必要である。

住宅のエネルギー消費量を用途別に把握する手法は大別すると、直接計測法<sup>1)</sup>、積上法（一部コンピュータシミュレーションも含む<sup>2)</sup>）と光熱費分析法の3種類がある。特に

光熱費分析法は手軽で安価に実施できるので多くの先行研究<sup>3)~7)</sup>がある。先行研究と本研究の比較を表 1 に示す。先行研究の光熱費分析法のほとんどは年間のエネルギー種別ロードカーブを季節性の有無で各用途に分解をするもので以下 LC 法と記す。

しかし LC 法には次のような問題がある。1. 光熱費支出時と使用時期の不整合。2. エネルギー小売事業自由化による契約内容の多様化・複雑化。3. 再生可能エネルギーなど光熱費で把握できない需要の増加。4. 全電化住宅普及による季節性が不明瞭化、などである。そこで家族属性やライフスタイル、所有機器などエネルギー消費

表 1 各種用途分解手法研究報告と本報比較

| 文献                       | 分解手法 | 購入エネルギー + $E_r$ |           |             |           |                  |            | 再生可能エネ              |                    |
|--------------------------|------|-----------------|-----------|-------------|-----------|------------------|------------|---------------------|--------------------|
|                          |      | 冷房<br>$c$       | 暖房<br>$h$ | 給湯<br>$w_u$ | 融雪<br>$s$ | 調理<br>コンロ<br>$d$ | その他<br>$o$ | 発電<br>自家消費<br>$E_r$ | 太陽<br>熱給湯<br>$w_r$ |
| 住環境計画研究所 <sup>3)</sup>   | LC   | ○               | ○         | ○           | -         | ○                | -          | -                   |                    |
| エネルギー経済研究所 <sup>4)</sup> | LC   | ○               | ○         | ○           | -         | ○                | -          | -                   |                    |
| 環境省 <sup>5)</sup>        | LC   | ○               | ○         | ○           | -         | ○                | ○          | -                   |                    |
| 田中他 (2016) <sup>6)</sup> | ※    | -               | -         | -           | -         | -                | △          | △                   |                    |
| 田中 (2019) <sup>7)</sup>  | LC   | ○               | ○         | ○           | -         | ○                | ○          | ○                   |                    |
| 本報                       | RSVD | ○               | ○         | ○           | ○         | ○△               | ○          | △                   |                    |

○ : 推定, - : 非推定, △ : デフォルト式  
LC : 負荷季節変動パターン解析  
RSVD : 特異値分解の正則化解  
※ : コンピュータシミュレーション, 重回帰分析等

行動要因を調査し、機械学習などで用途推定を試みる研究もあるが、過学習を回避するため正確で詳細なビッグデータの蓄積を必要とする。しかしエネルギー消費行動の回答は誤記入や記入漏れも多く、誤情報を根絶することは困難である。今後住宅がより情報化が進むことは明らかであるが当面はガスや灯油は光熱費データの分析が中心であると予想され時系列データ間の時間不整合やエネルギー消費行動要因の誤情報が問題であり続けるであろう。そこでエネルギー消費行動を正確に把握できなくてもロバストに用途分解可能なツールの開発が期待される。

Corresponding author; Akio Tanaka, e-mail : a-tanaka@pu-kumamoto.ac.jp  
\* 熊本県立大学環境共生学部居住環境学専攻教授  
〒862-8502 熊本県熊本市東区月出 3-1-100

本研究ではエネルギー需要の約70%が季節性の高い需要である<sup>7)</sup>ことに注目した。またこれまで検討されなかった融雪需要も季節性が強いのでこれも分解対象として追加した。残りの厨房コンロ、その他の2用途は季節性が小さく定格値とみなせる。季節性のエネルギー消費行動が常に同一の行動原理で発動するとすれば、原因(用途)と結果(総エネルギー需要)はn元連立方程式で表現でき、データが揃えば、用途分解の解が一意に得られるはずである。しかしこの逆問題は多くの場合「悪条件方程式」となる。悪条件方程式とは、説明変数(原因)の微小変化に対して被説明変数(結果)が大きく変動する方程式の事で、それは標本サイズが説明変数より小さい、観測データに誤差が混入する、データの欠落があるなどが原因とされる。エネルギーの場合は光熱費支出と使用期間の不整合も大きな誤差要因である。加えて用途分解のための補助情報(所有機器やその稼働率、用途別エネルギー種の記載)の誤記入・欠落、気象観測点の相違なども誤差の原因となる。

本研究では、住宅のエネルギー需要と気象データの相関性を利用し用途分解を行うが、悪条件方程式でも安定解を得るように正則化処理を行う。その手法の実用性の確認には、環境省「家庭部門のCO2排出実態統計調査」<sup>5)</sup>(家庭CO2統計)と「都民のくらしむき」<sup>9)</sup>データを用い後者ではCOVID-19下での都民のエネルギー消費への影響についても分析を行う。

## 2. 用途分解手法の概要

### 2.1 前提条件・基本用語の定義

本研究では、エネルギー量は全て最終エネルギー消費量でMJfと記す。またここで「地域」とは省エネルギー法の地域区分I~VIII地域である。

用途分解対象の「家庭CO2統計」の個票データや「都民のくらしむき」データ、気象データ<sup>10)</sup>を「観測値」、本研究で推定したエネルギー需要を「状態値」と記す<sup>8)</sup>。家庭CO2統計は「試験調査」、「H29年調査」と「H30年調査」の3調査データを用いる。

分解対象は購入エネルギー3種(ガス2種類は1種類にまとめた)で、推定する再生可能エネルギーは太陽光発電の自家消費量 $E_r$ と給湯用太陽熱利用量 $w_r$ の2種類である。そのエネルギーの略記号を**表2**に示す。

電力 $E$ は、購入電力 $E_u$ と太陽光発電自家消費電力 $E_r$ の合計値である。エネルギー需要は6用途に分解するがこの用途の略記号は**表1**で示す。給湯 $w$ は、購入エネ

**表2** 推定対象エネルギー

| エネルギー | 電力    |       | ガス  | 灯油  | 給湯用太陽熱 |
|-------|-------|-------|-----|-----|--------|
| 記号    | $E$   |       | $G$ | $K$ | $W_r$  |
|       | $E_u$ | $E_r$ |     |     |        |

※ $E_u$ :購入電力,  $E_r$ :自家消費電力(計測値またはデフォルト式より推定)

**表3** 説明変数及び略記号

| 変数名                           | [単位]                 |
|-------------------------------|----------------------|
| $CDD$ : 冷房度日 ( $DD_{22-24}$ ) | [°C・日]               |
| $HDD$ : 暖房度日 ( $DD_{14-14}$ ) | [°C・日]               |
| $WDD$ : 給湯度日 ( $DD_{40-40}$ ) | [°C・日]               |
| $SD$ : 降雪日数                   | [日]                  |
| $I$ : 水平面全天日射量                | [MJ/m <sup>2</sup> ] |

ギー $w_u$ と太陽熱温水器の給湯利用 $w_r$ の合計である。

### 2.2 用途分解手法

#### (1) 特異値分解法による用途分解

本研究ではエネルギー需要を気象要素を説明変数とする線形一次連立方程式で考える。光熱費支出月と実使用時期の不整合は、四半期データにまとめることで最小化する。この逆問題の解法には正則化した特異値分解法(RSVD: Regularized Singular Value Decomposition Method)を用いる。この手法の実施手順は以下の通りである。

最初に、エネルギー観測値ベクトルを $\mathbf{Y}$ とする。説明変数ベクトルは $\mathbf{X}$ 、用途別係数ベクトルは $\mathbf{K}$ である。この関係式は(1)式となる。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{K}^T \quad (1)$$

$\mathbf{X}$ の各要素は**表3**に示す。厨房コンロ $d$ とその他 $o$ は気象依存性はないものとする。給湯需要 $w$ の説明変数としては新指標である給湯度日( $WDD$ )を用いる。また融雪エネルギー $s$ の説明変数は降雪日数( $SD$ )である。本来は $s$ の説明変数は降雪量が適切と考えるが、降雪量の地域情報の整備が不十分なため $SD$ を採用した。

$\mathbf{K}$ は特異値分解法により求められるが、悪条件連立方程式となる可能性を考慮して(2)式によるL2正則による罰則を付加して<sup>11)</sup>得られる $\mathbf{K}^r$ を採用する。

$$\mathbf{K}^r = \arg \min_{\mathbf{K}} \left\{ \|\mathbf{X}\mathbf{K}^T\|_2 + \alpha \|\mathbf{K}\|_2 \right\}, \quad \alpha \geq 0 \quad (2)$$

ここで $\alpha$ は罰則の強さを調整するパラメータである。

(2) 用途別エネルギー用途係数  $k$

$k_i$  は用途別係数ベクトル  $\mathbf{K}^r$  の要素であり (3) 式と同義である。

$$k_i = y_i/x_i \quad (3)$$

ここで  $i$  は用途,  $y$  はそのエネルギー消費量,  $x$  は用途  $i$  の説明変数である。なお  $k_i$  にはそれぞれ物理的制約条件があり, それを満たさない場合は  $k_i=0$  となる。この値を全エネルギーについて求めたとき「総合エネルギー係数」と記す。この係数は用途  $i$  の気象要素単位量当たりのエネルギー量 (原単位) である。この値を相互比較することで, エネルギーが消費される構造に相違があるか判定できる。また同係数が不安定な場合は, 設備異常等の指標にもなりうる。

(3) 厨房用電気コンロ  $d_E$  のデフォルト式

厨房用コンロ  $d$  は季節性のない世帯別定数項である。ガスは定数項が  $d$  のみなので RSVD で分離可能であるが, 電力は定数項がその他  $o$  と 2 種類あるため分離不能なので厨房用電気コンロはデフォルト式 (4) を用いる。

$$d_E = F \cdot a \cdot \exp(b \cdot F) / 12 \quad (4)$$

$Y: GJf / (\text{世帯} \cdot \text{月}), F: \text{世帯員数}, a, b: \text{回帰係数}$

このデフォルト式は全住宅共通式 (図 1 左) と都市規模, 住宅タイプを考慮した式 (係数  $a, b$  は図 1 右) がある。デフォルト式の作成には, 3 調査の個票データ (ガス使用世帯のうち, ガス用途が厨房コンロに限定できる 3,959 件) から, 一人当たりガス消費量原単位について指数回帰して求めた。電力コンロとのエネルギー効率の相違は無視できるものとしている。

2.3 再生可能エネルギー利用量の推定

2 種類の再生可能エネルギー量はデフォルト式により推定する。

(1) 太陽電池発電自家消費量  $E_r$

自家消費量値  $E_r$  が, パワーコンディショナーや HEMS 等から入手できない場合には (5) 式を用いる。

$$E_r = (0.0111 \ln(E_u) + 0.0665) \cdot I \cdot PV \cdot 3.6 \quad (5)$$

ここで,  $E_u$  は購入電力量  $[MJf/月]$ ,  $I$  は 1 月当たり水平全天日射量  $[MJ/m^2 \cdot \text{月}]$ ,  $PV$  は太陽電池定格容量  $[kW]$  である。

デフォルト式は, 家庭 CO2 の 3 調査個票データ (自家消費電力有効データ 1,595 件) の解析結果である。同データの  $E_r$  と総電力需要  $E$  と発電量の関係を図 2 に示す。発電量平均は 151kWh/月であるが,  $E_r$  の平均は 48kWh/月である。 $E_r$  の 75% 累積値は 59kWh/月なので 70% 以上の

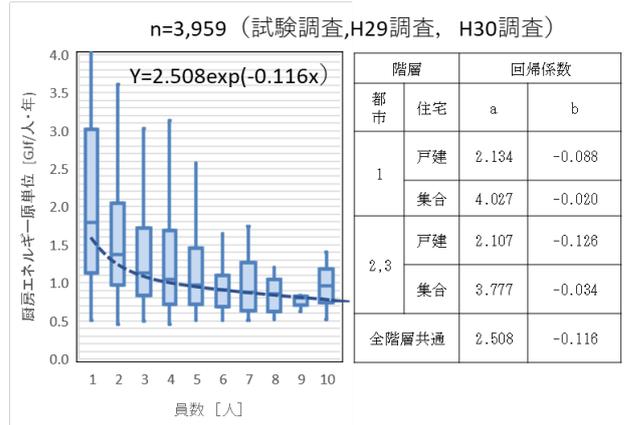


図 1 厨房コンロ原単位の分布とデフォルト式係数

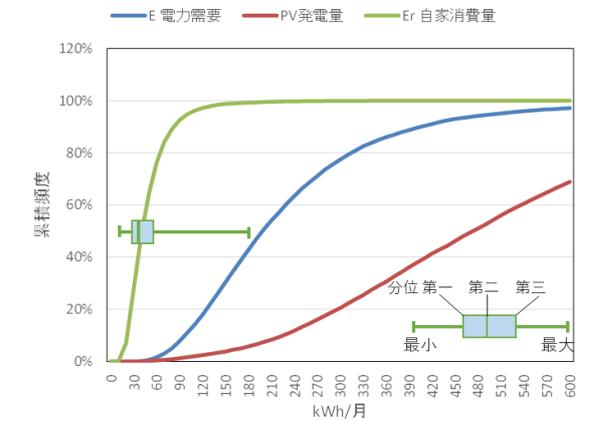


図 2 電力需要・発電量及び自家消費量累積頻度分布

月が  $E_r$  は発電量の半分以下であること,  $E_r$  は太陽電池の容量よりも電力需要  $E$  に強く依存していることがわかる。これは先行研究<sup>6)</sup> 結果とも一致している。本研究では  $E$  が不明な場合を想定しているためデフォルト式には, 購入電力  $E_u$  を説明変数として用いる。

(2) 太陽熱給湯利用  $w_r$

太陽熱の給湯利用量  $w_r$  は, 文献<sup>6)</sup> より作成したもので (6) 式より求める。ここで  $F$  は世帯員数  $[人]$ ,  $I$  は水平面全天日射量  $[MJ/m^2]$  である。

$$w_r = \begin{cases} 0.52FI, & \text{地域 I, II} \\ 0.82FI, & \text{地域 III} \\ 0.68FI, & \text{地域 IV} \\ 0.52FI, & \text{地域 V} \sim \text{VIII} \end{cases} \quad (6)$$

(6) 式は地域の最尤推定値を与える。

3. 用途分解法の適用結果

3.1 地域データの分析

地域別・属性別データから、用途別分解を行うとともに再生可能エネルギー利用量を推定した結果を図3に示す。対象データは家庭CO2調査のH30年データで、地域Iは都市タイプ2（5万人以上の都市で非札幌市）でその他II～VIII地域は、都市タイプ1（都道府県庁所在都市、政令指定都市）である。それぞれ用途分解を行い再生可能エネルギー利用量を推定した。

分析結果を図3に示す。エネルギー原単位が寒冷地域ほど大きくなる傾向は先行研究<sup>3)～7)</sup>とも一致する。またエネルギー係数Kの各要素の地域性や各種属性との関係から住宅性能やライフスタイルの違いなどが類推できる。

(1) 冷房係数  $k_c$  [MJf/CDD]

地域別、世帯員数別、住宅種別別冷房係数  $k_c$  の分布を図4aに示す。IV～VIII地域は冷房度日CDDが250～900と3倍以上の幅があるが冷房係数  $k_c$  は地域差がほとんどない。寒冷なI、II地域はCDDが小さく、 $k_c$  は温暖な地域より大きい。III地域は両地域の中間的な傾向を示す。

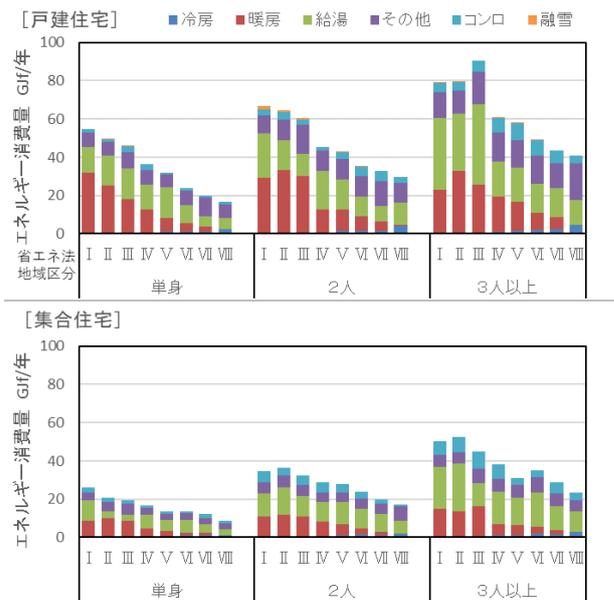
温暖なIV～VIII地域では、戸建住宅3人以上世帯の  $k_c$  が約4.5、2人世帯が約3.5、単身世帯が約2.5である。寒冷なI、II地域は  $k_c > 10$  である。集合住宅ではIV～VIII地域の3人以上世帯が約3.5、2人世帯が約2.5、単身世帯が約1.8である。I地域は  $k_c = 10.8$  と大きくII、III地域は温暖な地域との中間的な値をとる。

寒冷地域で  $k_c$  が大きくなる理由は実際の冷房期間がCDDで予想する期間よりも長い、この地域住宅の高い断熱性能が原因で、内部熱負荷が蓄積しやすいなどが理由として考えられる。世帯員数と  $k_c$  が比例するのは、人体と機器の発熱が大きいためと考えられる。集合住宅の  $k_c$  が戸建住宅より小さいのは、住宅の断熱性能や空調面積の違いと考えられる。

(2) 暖房係数  $k_h$  [MJf/HDD]

地域別、世帯員数別、住宅種別別総合暖房係数  $k_h$  の分布を図4bに示す。最も温暖なVIII地域以外のI～VII地域ではHDDが500～2500と5倍の差はあるが、地域差は小さく全地域類似した値を示す。集合住宅の  $k_h$  は戸建住宅の約1/2と小さい。世帯人員の差も小さく、単身の戸建住宅のみ地域差が認められる。

戸建住宅I～VII地域では2人と3人以上世帯ともに  $k_h$  は約13.0、集合住宅は同じく約5.5である。単身世帯は集合住宅がI～VII地域が約3.5で地域差が無い。



地域区分：省エネ法地域区分による  
 該当世帯：家庭CO2調査H30年度調査（I地区：都市タイプ2、II～VIII地区：都市タイプ1）

図3 地域別エネルギー消費原単位用途分解結果

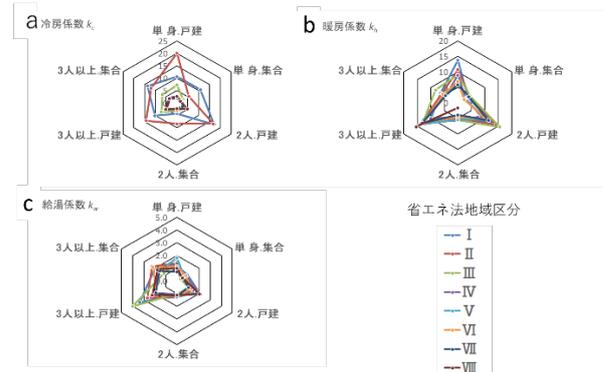


図4 地域区分別用途別総合エネルギー係数

この結果は、住宅の断熱性能が地域のHDDに関係せず同一水準であることを示している。

地域差が認められる単身の戸建住宅は、VII地域からI地域へと寒冷化がすすむにつれ  $k_h = 5.8$  から13.8と約2倍になる。原因は単身世帯の戸建住宅が空調空間が大きいこと、非空調室内への熱ロスが大きいことが考えられる。

(3) 給湯係数  $k_w$  [MJf/WDD]

地域別、世帯員数別、住宅種別別給湯係数  $k_w$  の分布を図4cに示す。戸建住宅のI～III地域の3人以上世帯を除くと、戸建住宅の3人以上世帯（IV～VIII地域）の  $k_w$  は約2.5、2人世帯で約1.6、単身世帯で約1.3である。

集合住宅は3人以上世帯で約1.8, 2人世帯で約1.2, 単身世帯で約0.6で安定し, 帯員数と係数 $k_w$ は比例関係がある。戸建住宅が集合住宅より大きいのは, 戸建住宅の給湯スタイルが多様なこと, バスタブのサイズが集合住宅より大きいことが原因と考えられる。

(4) 融雪係数 $k_s$  [MJf/SD]

融雪設備を有する住宅のうち, エネルギー情報の欠落がない住宅171戸の平均データをRSDV法で求めると融雪係数 $k_s=24.4$ である。住宅毎の解析では係数がその10%~数倍の範囲の中があり, 地域性や世帯員数との関係は明瞭には確認できない。

### 3.2 住宅単体分析

家庭CO2統計の個票データの分析結果をエネルギーマトリックスにして表4に示す。これは都市タイプ1, 戸建住宅, 世帯員数3人の条件で, 融雪エネルギー使用, 太陽電池所有, 太陽熱利用世帯をそれぞれ1戸づつ無作為抽出した住宅である。

住宅A(II地域, 面積200㎡)は灯油融雪装置を有し年間エネルギー消費量は125.0GJf/年である。図3の地区・戸建・人数が共通グループ(同グループ)平均の79.5GJf/年より1.6倍大きい。給湯用エネルギー $w$ と暖房原単位 $h$ も同じく平均1.6倍である。しかし融雪用エネルギー $s$ は9.1Gf/年( $k_s=71.8$ )で, 同グループ内で融雪装置を有する住宅の融雪エネルギー平均79.5GJ/年の1/8以下と小さいが $k_s$ は171戸平均 $k_s=24.4$ の3倍と大きい。

住宅B(V地域, 面積144㎡)は, 3kWの太陽電池を有し, 年間エネルギー消費量は自家消費電力 $E_r$ を含めて42.7GJf/年と同グループ平均58.0GJf/年より25%少ない。 $E_r$ は4.1GJf/年(1,125kWh)で同グループ内でPV所有世帯平均 $E_r=6.2$ GJf/年の約65%と少ない。用途別エネルギーでは $w$ のみ同グループ平均値の50%以下と小さい。

住宅C(V地域, 面積119㎡)は, 太陽熱温水器を有し, 年間エネルギー消費量は再生可能エネルギーも含め51.7GJf/年で, 同グループ平均58.0GJf/年よりも10%少ない。全給湯全需要 $w$ は $w_r$ も含め27.4GJf/年で, 同グループで太陽熱を利用する世帯平均の $w_r$ が17.5GJf/年なのでその1.4倍と大きい $w$ は約10%少ない。 $w_u$ と $w_r$ に相関性を仮定すると,  $w_r$ が $w_u$ の10倍超と大きいのは不自然であり過大推定となっている可能性がある。

### 3.3 COVID-19パンデミックの影響量分析

COVID-19パンデミックの都民エネルギー消費への影響を分析するため, エネルギー消費の用途分解を行った。用いたデータは東京都「都民の暮らしむき」<sup>9)</sup>2017年

表4 世帯別エネルギーマトリックス

住宅A. II地区, 融雪有, PV無, 太陽熱無 [GJf/年世帯]

| 融雪装置あり | 電力※  | ガス  | 灯油   | 太陽熱 | 計     |      |
|--------|------|-----|------|-----|-------|------|
| 冷房     | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0 | 0.0   | 0%   |
| 暖房     | 21.9 | 0.0 | 20.8 | 0.0 | 42.6  | 34%  |
| 給湯     | 0.0  | 0.4 | 48.0 | 0.0 | 48.4  | 39%  |
| その他    | 20.6 | 0.0 | 0.0  | 0.0 | 20.6  | 16%  |
| コンロ    | 2.7  | 1.7 | 0.0  | 0.0 | 4.3   | 3%   |
| 融雪     | 0.0  | 0.0 | 9.1  | 0.0 | 9.1   | 7%   |
| 計      | 45.1 | 2.1 | 77.8 | 0.0 | 125.0 | 100% |
|        | 36%  | 2%  | 62%  | 0%  | 100%  |      |

※内 太陽光発電自家消費量: 0.0 GJf/年/世帯

住宅B. V地区, 融雪無, PV 3kW, 太陽熱無 [GJf/年世帯]

| 融雪装置あり | 電力※  | ガス   | 灯油   | 太陽熱 | 計    |     |
|--------|------|------|------|-----|------|-----|
| 冷房     | 0.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.5  | 0%  |
| 暖房     | 1.9  | 2.1  | 12.1 | 0.0 | 16.1 | 13% |
| 給湯     | 0.0  | 4.0  | 4.2  | 0.0 | 8.2  | 7%  |
| その他    | 14.2 | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 14.2 | 11% |
| コンロ    | 0.0  | 5.4  | 0.0  | 0.0 | 5.4  | 4%  |
| 融雪     | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0%  |
| 計      | 16.6 | 11.5 | 16.3 | 0.0 | 44.4 | 35% |
|        | 13%  | 9%   | 13%  | 0%  | 35%  |     |

※内 太陽光発電自家消費量: 4.1 GJf/年/世帯

住宅C. V地区, 融雪無, PV無, 太陽熱有 [GJf/年世帯]

| 融雪装置あり | 電力※  | ガス  | 灯油  | 太陽熱  | 計    |     |
|--------|------|-----|-----|------|------|-----|
| 冷房     | 0.9  | 0.0 | 0.0 | 0.0  | 0.9  | 1%  |
| 暖房     | 0.9  | 1.9 | 8.6 | 0.0  | 11.5 | 9%  |
| 給湯     | 0.0  | 2.1 | 0.0 | 25.0 | 27.0 | 22% |
| その他    | 10.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0  | 10.1 | 8%  |
| コンロ    | 0.0  | 1.7 | 0.0 | 0.0  | 1.7  | 1%  |
| 融雪     | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 0.0  | 0.0  | 0%  |
| 計      | 12.0 | 5.7 | 8.6 | 25.0 | 51.3 | 41% |
|        | 10%  | 5%  | 7%  | 20%  | 41%  |     |

※内 太陽光発電自家消費量: 0.0 GJf/年/世帯

~2020年のデータで, 以下2017年~2019年の3年間をパンデミック前, 2020年をパンデミック後と記す。

「都民の暮らしむき」データは全て「2人以上世帯」でその内数として「夫婦と未婚子世帯」, 「夫婦のみ世帯」と「片親と未婚子世帯」の3属性に着目し用途分解を行った。この結果を図5に示す。パンデミック前・後で「2人以上世帯」のエネルギー消費量はほとんど変化せず, パンデミック前3年間の平均43.5GJf/年はパンデミック後43.2GJf/年と微減である。しかし「片親と未婚子世帯」では36.0GJf/年から38.8GJf/年へと8%増加している。

図6に「2人以上世帯」と「片親と未婚子世帯」のパンデミック前後の用途別エネルギー消費比率を示す。

「2人以上世帯」は厨房コンロ $d$ が22%から32%に10

ポイント増加し、暖房用エネルギー $h$ は6%から11%と5ポイント増と倍増している。

「片親と未婚子」は $d$ が25%から31%と6ポイント増加し、 $h$ は6%から11%と同じく倍増している。2020年2月の学校一斉休校や緊急事態宣言発令による在宅率の上昇が原因と考えられる

**表5**に用途別エネルギー係数のパンデミック前後の変化率を示す。ほとんどの世帯属性で冷房係数 $k_c$ と給湯係数 $k_w$ の減少と暖房係数 $k_h$ の増加がある。エネルギー係数の変化率では「片親と未婚子」の $k_h$ が144%増と顕著に増加している。学校一斉休校による在宅率の上昇が影響したものと思われる。「夫婦と未婚子」世帯は、他の世帯とは異なる動きを示し、 $k_c$ と $k_w$ は増加し $k_h$ が減少している。

#### 4. まとめ

本研究では、住宅エネルギー消費を冷房、暖房、給湯、厨房コンロ、融雪、その他の6用途に分解する手法として特異値分解の正則化処理(RSVD: Regularized Singular Value Decomposition Method)を提案した。また再生可能エネルギー(太陽電池発電自家消費、太陽熱給湯利用)の利用量についてもデフォルト式を提案した。RSVD法による用途分解法は、エネルギー消費量(被説明変数)と気象データ(説明変数)の相関性を想定しL2正則化処理することで誤差への鋭敏性を小さくしている。そしてその解をエネルギー用途係数ベクトル $\mathbf{K}^r$ とした。

再生可能エネルギー2種はデフォルト式を提案したが、太陽光発電自家消費量 $E_r$ では安定した精度が期待できるが、太陽熱利用量 $w_r$ のデフォルト式は精度が不安定であった。

RSVD法による用途分解の有効性を確認するため、家庭CO2統計データを解析した。冷房、暖房の地域別エネルギー係数の地域差が小さいことから、住宅の断熱性能が地域の気候を反映したものとなっていないこと、給湯エネルギー需要が地域の給湯度日WDDを反映していることを示した。また給湯エネルギーと世帯員数との比例関係も確認された。

COVID-19パンデミック前後の東京都民のエネルギー消費量を分析した結果、総エネルギー量は変化していないが、厨房コンロや暖房など用途別割合に変化があることが明らかになった。「片親と未婚子」では総エネルギー需要が8%増大し厨房コンロや暖房の増大が確認され

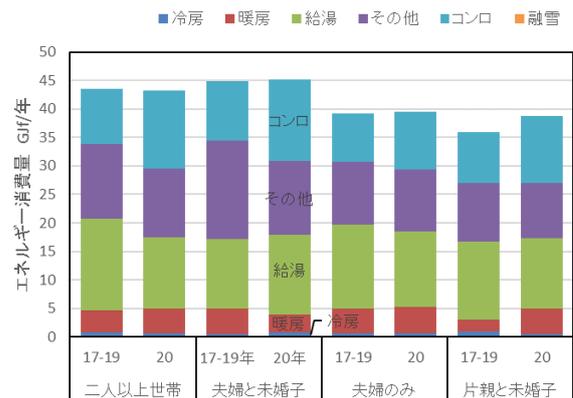


図5 東京都民の世帯属性別原単位

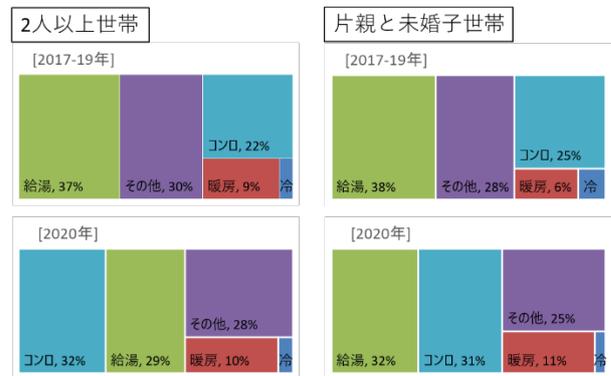


図6 COVID-19前後の都民エネルギー原単位の構成

表5 COVID-19前後都民のエネルギー係数の変化

|          | 2人以上世帯 |     |      | 夫婦と未婚子 |     |      |
|----------|--------|-----|------|--------|-----|------|
|          | 17-19年 | 20年 | 変化率  | 17-19年 | 20年 | 変化率  |
| 冷房 $k_c$ | 2.0    | 1.9 | -6%  | 1.4    | 1.5 | 12%  |
| 暖房 $k_h$ | 4.7    | 5.9 | 25%  | 5.2    | 4.0 | -24% |
| 給湯 $k_w$ | 1.9    | 1.5 | -22% | 1.4    | 1.6 | 10%  |

|          | 夫婦のみ   |     |      | 片親と未婚子 |     |      |
|----------|--------|-----|------|--------|-----|------|
|          | 17-19年 | 20年 | 変化率  | 17-19年 | 20年 | 変化率  |
| 冷房 $k_c$ | 2.0    | 1.5 | -21% | 2.5    | 1.5 | -42% |
| 暖房 $k_h$ | 4.9    | 6.4 | 30%  | 2.5    | 6.1 | 144% |
| 給湯 $k_w$ | 1.7    | 1.6 | -9%  | 1.6    | 1.4 | -10% |

た。暖房エネルギー係数も144%に増加しており単位暖房度日あたりエネルギー消費量が倍増したことを示している。これは学校への休校要請や緊急事態宣言による在宅率上昇が影響していると予想される。しかし「夫婦と未婚子」世帯では厨房コンロや暖房が減少し、他の用途が増大するなど逆の傾向を示している。RSVD法の過学習の可能性も含め原因解明調査が必要である。

今回提案した RSVD 法は、少数データでも住宅のエネルギー用途解析に安定した解析精度が期待でき、今後は省エネ診断への応用について研究を進めたい。またデフォルト式に依存しない太陽熱給湯利用量の推定法についても研究する予定である。

## 謝辞

本研究実施に当たり、貴重な情報を提供いただいた環境省地球環境局総務課低炭素社会推進室様、家庭部門の CO2 排出実態統計調査利用研究会事務局の運営にご尽力いただいた一般社団法人 エネルギー・資源学会様に、謝意を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 井上智樹, 松岡綾子, 下田吉之, 寒川純一: スマートメータデータの用途分解手法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 743(2018), pp. 77-86.
- 2) 松岡綾子, 杉山みなみ, 桃木貴志, 山口容平, 下田吉之: 長期エネルギー需給見通しにおける家庭部門 CO2 排出削減見込み量の検証, 757(2019), pp. 323-333.
- 3) 住環境計画研究所: 家庭用エネルギーハンドブック (2009年版), (財) 省エネルギーセンター, 2009
- 4) 日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター: エネルギー・経済統計要覧, 省エネルギーセンター, 2013
- 5) 環境省: 家庭部門の CO2 排出実態統計調査 (家庭 CO2 統計), <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html>, (アクセス日 2021.4.2)
- 6) 田中昭雄, 石原修: 住宅用太陽エネルギー利用設備の省エネルギー効果に関する研究, 太陽エネルギー, 41-6(2015), 41-48.
- 7) 田中昭雄: 住宅エネルギー消費構造の時系列変化, エネルギー・資源学会論文誌, 40, 2, 234(2019), pp. 21-27
- 8) 北川源四郎: 一般化状態空間モデルによる時系列のモデリング, 計測と制御, 38-7(1999), pp. 427~432.
- 9) 東京都: 都民のくらしむき;2000-2020, <http://www.toukei.metro.tokyo.jp/seikei/sb-index.htm>, (アクセス日 2021.6.1)
- 10) 気象庁: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>. (アクセス日 2021.4.1)
- 11) G. R. Pasha, Muhammad Akbar Ali Shah: Application of Ridge Regression to Multicollinear Data, Journal of Research(Science), Bahauddin Zakariya University, Multan, Pakistan, 15-1(2004), pp. 97-106.

# 気象が家庭部門のエネルギー需要に及ぼす影響の評価

## Evaluating the Impact of Weather Conditions on Residential Energy Demand

中村 仁明 \*・下田 吉之 \*\*  
Masaaki Nakamura Yoshiyuki Shimoda

### **Abstract**

In October 2020, the Japanese government stated that it would seek to achieve carbon neutrality with practically zero greenhouse gas emissions by 2050. In response to this announcement, local governments and private companies also strive to decarbonize. In order to achieve this ambitious goal reliably, it is necessary to accurately capture energy use and to implement and consider effective measures. In this study, we quantitatively assessed the impact of climate on energy consumption per household in order to better understand the factors that fluctuate in energy consumption in the residential sector. As a result, results consistent with fluctuations in actual energy consumption were obtained for electricity, city gas, and LPG, but the opposite trend was shown for kerosene, mainly in eastern and northern Japan. Possible causes include the low accuracy of the ANN model for estimating kerosene consumption, and the fact that it was strongly affected by fluctuations in demand for city gas and LPG used when converting purchased amount into consumption.

**Keywords** : Global warming, Climate condition, Energy, Residential sector, Artificial neural network

## 1. はじめに

2019年6月に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略<sup>1)</sup>」において最終到達点としての「脱炭素社会」が掲げられ、2050年までに80%の温室効果ガス削減に取り組む方針が示された。また、各国の相次ぐ脱炭素化に向けた戦略の発表を受け、2020年10月には2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロとするカーボンニュートラルを目指すことが首相より宣言されている<sup>2)</sup>。脱炭素化に向けた取り組みは地方自治体等にも相次いでおり<sup>3)</sup>、この野心的な目標を確実に達成するために、より詳細なエネルギー消費量の把握と、それを踏まえた効果的な対策の実施が今後益々重要になる。

家庭部門のエネルギー消費量は産業部門や運輸部門と比較し、気象の変化に敏感であることが知られている。このため、当該部門における対策の検討や評価を行う上で、気象の変化がエネルギー消費量へ与える影響を正確に把握することは重要である<sup>5),6)</sup>。Shimoda et al. (2006)<sup>7)</sup>では、都市のヒートアイランドや地球温暖化による外気温の変化によるエネルギー消費量の影響を評価している。著者らは、気象影響が生活様式や気候の違いのみならず、エネルギーシステムの変化による影響も大きく受けると指摘している。同様の結果は環境省が実施した平成30年度調査<sup>8)</sup>においても報告されており、気象影響によるエネルギー消費の変化を正確に評価するうえで、各世帯がもつ特性も十分に考慮することが重要である。しかしながら、一般的に利用され

る公的統計データは統計調査によって得られた個票データを集計することでオープンデータ化しているため、集計データを用いた分析では個票が持つ各世帯の特性を十分に反映できない。そこで、本研究では環境省が一般統計調査として実施している「家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態調査(以下、家庭CO<sub>2</sub>統計)」の個票データを用いることで、個々の世帯特性を十分に考慮した気象影響の定量的な評価を実施する。

## 2. データおよび分析手法

### 2.1 使用データ

#### (1) 家庭CO<sub>2</sub>統計

環境省では、家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態やエネルギー消費実態の詳細な基礎データの整備を目的に全国の世帯を対象とした家庭CO<sub>2</sub>統計調査を実施している。平成29年度及び平成30年度調査では全国13,000世帯を対象に月別燃料種別エネルギー消費量や世帯属性、住宅属性、機器使用状況、省エネルギー行動実施状況等、多岐にわたる項目を調査している。本研究では平成29年度及び平成30年度調査のうち有効サンプルとなった計19,501世帯(平成29年度9,505世帯、平成30年度9,996世帯)の個票データを用い、月別燃料種別に独立してエネルギー消費量を推計するANNモデルを構築した。

#### (2) 過去の気象データ(気象庁)

気象データとして、地上気象観測所及び地域気象観測システム(アメダス)の月別観測データを用いた。地上気象観測所は全国約60か所、地域気象観測システムは全国約1,300か所存在し、気温や降水量、日照時間や風速等の観測結果を公開している。なお、観測点により測定可能なデー

\*三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社  
〒105-8501 東京都港区虎ノ門5-11-2 オランダヒルズ森タワー  
E-mail: masaaki.nakamura@murc.jp  
\*\*大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻  
〒565-0871 吹田市山田丘2-1, M3棟3階

タが異なる点に注意が必要である。

## 2.2 モデル理論

人工ニューラルネットワーク(ANN)とは、ニューロンと呼ばれる素子を層状につなぎ合わせたアーキテクチャである。入力層、中間層及び出力層から構成される。各層における入出力の関係は以下のとおりである。

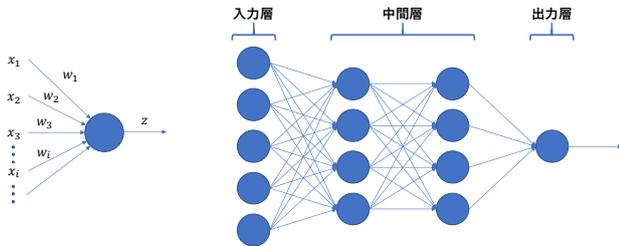


図 1 順伝播型 ANN の例

入力層は、モデルへの入力ベクトル $\mathbf{x}$ を変換せず、そのまま次層へ出力する。中間層は入力層と異なり、入力された値を変換し次層へ出力する。中間層に属する第 $l$ 層中の $j$ 番目のニューロンへの入力 $u_j^{(l)}$ は式(1)で与えられる。ここで、 $w_{ji}^{(l)}$ は第 $l-1$ 層のニューロン $i$ と第 $l$ 層のニューロン $j$ との結合の強度、 $z_i^{(l-1)}$ は第 $l-1$ 層のニューロン $i$ からの入力を示す。

$$u_j^{(l)} = \sum_i w_{ji}^{(l)} z_i^{(l-1)} \quad (1)$$

第 $l$ 層中の $j$ 番目のニューロンへ入力された $u_j^{(l)}$ は、式(2)によりニューロン固有のバイアスを加えた上で活性化関数 $f(l)$ により変換され、第 $l+1$ 層に属する各ニューロンへ伝播される。なお、本分析では活性化関数として式(3)で定義される ReLU 関数を用いた。ここで、 $b$ はバイアスを示す。

$$z_j^{(l)} = f(u_j^{(l)} + b_j^{(l)}) \quad (2)$$

$$f^{(l)}(u) = \max\{0, u + b\} \quad (3)$$

第 $L$ 層の出力層では、前層である第 $L-1$ 層の出力ベクトル $\mathbf{z}^{(L-1)}$ に重みベクトル $\mathbf{W}^{(L)}$ を作用させた入力ベクトル $\mathbf{u}^{(L)}$ を、出力関数により変換することで予測値 $\hat{\mathbf{y}}$ を出力する。なお、中間層同様、出力関数に ReLU 関数を用いた。

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{z}^{(L)} = f(\mathbf{u}^{(L)} + \mathbf{b}^{(L)}) \quad (4)$$

## 2.3 モデル構築手法

今回構築した ANN の層数は 10 層であり、中間層のニューロン数はいずれも 400 とした。教師データからの学習は

誤差逆伝播法による。なお、本研究では月別電力、都市ガス、LPG、灯油消費量を独立に推計するモデルを 4 つ構築する。本研究における具体的な構築手順は以下の通り。

### (1) 灯油消費量の補正

家庭 CO<sub>2</sub> 統計で計上されている灯油消費量は、正確には灯油購入量である。使用月と購入月のずれにより推計精度が低下する可能性があるため、本調査では四半期ごとに灯油購入量を合計し、その合計値を同期間における都市ガス(都市ガス需要のない世帯は LPG)消費量を按分指標に各月へ配分した。

### (2) 個票データと気象データの紐づけ

個票データと気象データは観測点が異なるため、このままではデータを対応させることができない。本研究では、住宅の所在地から最も距離の近い観測地点の気象データを当該住宅の気象データとして紐づけた。なお、家庭 CO<sub>2</sub> 統計の個票データからは各住宅の所在市区町村のみ把握可能である。そのため、「住宅の多くが街の中心部に存在する」と仮定し、各個票の所在地は所在市区町村の庁舎の住所とした。

### (3) 特徴量の設定

特徴量として設定した項目は表 1 のとおり。省エネ行動等の定性データはダミー変数化し、分散がゼロの特徴量は対象から除外した。なお、全ての特徴量は学習前に正規化している。

表 1 選択した特徴量

| 特徴量      |  |
|----------|--|
| 地域情報     | 緯度経度, 都市階級                                     |
| 居住者情報    | 年齢別世帯人数, 平日昼間の在宅状況, 世帯年収                       |
| 住宅情報     | 建て方別建築時期, 居室数, 延床面積, 二重サッシ有無                   |
| 機器保有     | 製造時期別保有台数 (質問項目に製造時期がない場合は保有台数)                |
| 平均的な機器使用 | 機器使用頻度, 調理食数等                                  |
| 省エネ行動    | 省エネ行動種別実施状況                                    |
| 気象データ    | 日最高(低)気温・風速・相対湿度・雲量の月平均, 降水量・降雪量・日照時間・雪日数の月合計, |

#### (4) 個票データのクリーニング

家庭 CO<sub>2</sub> 統計の有効サンプルのうち、欠損値が存在する個票は本研究の対象から除外した。また、当該燃料の消費量が1年を通じてゼロであった個票についても対象から除外している。データ総数 234,012 個(19,501 世帯×12 か月分)のうち、最終的に使用した訓練用データ、検証用データ、テスト用データの数は表 2 の通り。

表 2 訓練用・検証用・テスト用データの数

|      | 訓練用    | 検証用    | テスト用   |
|------|--------|--------|--------|
| 電力   | 84,829 | 18,178 | 18,178 |
| 都市ガス | 34,699 | 7,435  | 7,435  |
| LPG  | 27,398 | 5,871  | 5,871  |
| 灯油   | 26,362 | 5,650  | 5,650  |

#### (5) L2 正則化による過学習防止

ANN では、他の機械学習モデルと比較し格段に多い重みパラメータを含むため、不必要に自由度を大きくした場合、学習データのもつノイズまでも学習し過学習に陥る場合がある。本研究では過学習を避けるため、式(5)に示す L2 正則化による学習を実施した。

$$\arg \min Loss(\hat{y}, y) + \frac{\lambda}{2} \sum_i w_i^2 \quad (5)$$

### 2.4 気象影響評価手法

気象条件の変化がエネルギー消費量に与える影響を評価するため「2017 年度の個票セット」及び「気象データのみ 2018 年度値に更新した 2017 年度の個票セット」を用意し、構築した ANN に入力した。得られた予測値の差は気象状況の差異に起因するため、これを世帯当たりエネルギー消費量への気象影響としてみなして評価した。

## 3. 推計結果

### 3.1 推計精度

作成した ANN モデルの予測精度を確認するため、同様のデータセットを用いて構築した Lasso 回帰モデルとの比較を行った。Lasso 回帰とは、線形回帰の正則化で損失関数に L2 正則化項を加える手法である。正則化項を含めることで、重回帰分析と比較し特徴量が増加しても過学習に陥りにくいという性質がある。

#### (1) 電力・都市ガス・LPG

ANN モデル及び Lasso 回帰モデルによる月別世帯当たりエネルギー消費量の予測値と実測値の関係を図 2、表 3 に示す。予測値と実測値の決定係数はすべての燃料種で ANN が Lasso 回帰を大きく上回った。また、平均絶対誤差も、全

ての燃料種で ANN が Lasso 回帰を下回り、ANN モデルが Lasso 回帰モデルより予測精度が高いことが示された。

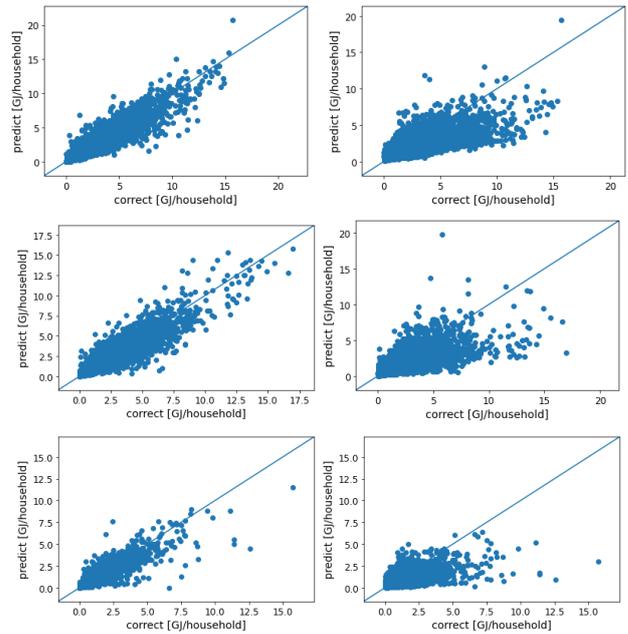


図 2 ANN(左図), Lasso 回帰(右図)による予測精度の比較  
(電力(上段), 都市ガス(中段), LPG(下段))

表 3 決定係数及び平均絶対誤差の比較

|      | R2    |       | MAE   |       |
|------|-------|-------|-------|-------|
|      | ANN   | Lasso | ANN   | Lasso |
| 電力   | 0.857 | 0.600 | 0.184 | 0.460 |
| 都市ガス | 0.900 | 0.564 | 0.240 | 0.544 |
| LPG  | 0.905 | 0.507 | 0.246 | 0.350 |
| 灯油   | 0.744 | 0.512 | 0.418 | 0.604 |

#### (2) 灯油

ANN モデル及び Lasso 回帰モデルによる月別世帯当たり灯油消費量の予測値と実測値の関係を図 3、表 3 に示す。予測値と実測値の決定係数は ANN で 0.744, Lasso 回帰で 0.512, 平均絶対誤差は ANN で 0.418, Lasso 回帰で 0.604 となり、ANN の予測精度が Lasso 回帰を上回った。

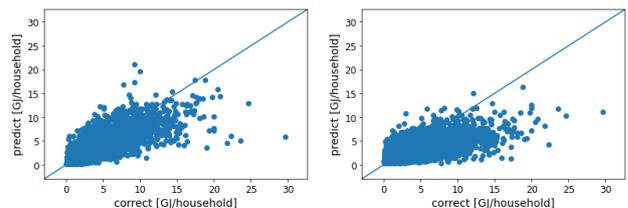


図 3 ANN による予測値と測定値の比較

しかし、他燃料種と比較すると ANN モデルの予測精度

が低く、過少学習または過剰学習に陥っている可能性が高い。学習曲線を確認すると、テストデータの推移は学習サンプルの増加とともに常に精度が向上しており、学習データは学習サンプルが12,500程度に到達した付近から精度が横ばいで推移している。このため、本モデルの予測精度を向上させるためには学習サンプル数の増加や新たな特徴量を設定することが効果的であると考えられる。しかしながら、利用可能な個票データはすべて利用しており、家庭CO<sub>2</sub>統計から直接得られる特徴量についても全て学習対象として取り扱っているため、現時点ではモデルの大幅な改善が困難である。そこで、本研究では、灯油消費推計モデルの予測精度が他燃料種と比較し低いことを留意しつつ、分析を実施した。

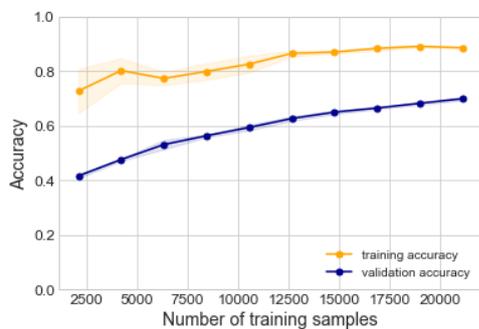


図 4 学習曲線の推移

### 3.2 気象影響評価

構築した ANN を用い、2017 年度から 2018 年度における都道府県別世帯当たりエネルギー消費量の変化量のうち気象による影響を定量的に評価した。

#### (1) 電力

気象の変化が世帯当たり電力消費量へ与える影響(以降、気象影響)を図 5、家庭 CO<sub>2</sub>統計から得られる実際の世帯当たり電力消費量の変化(以降、実績値変化)を図 6 に示す。夏季(6 月から 8 月)における気象影響は、西日本を中心に増加となっているが、これは 2018 年の記録的な猛暑による冷房需要の増加が表れたものだと考えられる。一方、冬季(12 月から 2 月)における気象影響は西日本で減少、東日本以北で増加となった。2018 年の冬は東・西日本を中心に高温となったため、暖房需要の減少により当該地域の電力需要は減少するものと思われる。しかし、気象影響は西日本で減少したものの、東日本以北では増加を示している。東日本以北における平均気温を月別にみると、12 月及び 2 月で前年度を上回ったものの、1 月は多くの地域で前年度を下回っている。気象影響も平均気温と連動するように 12 月及び 2 月でマイナス、1 月でプラスを示したものの、1 月における気象影響が 12 月及び 2 月における気象影響を大きく上回

ったため、冬季期間で気象影響がプラスとなっている。当該期間における実績値変化はマイナスとなっていることから、1 月の気象影響が過大評価されている、または 12 月及び 2 月の気象影響が過小評価されている可能性がある。



図 5 世帯当たり電力消費量への気象影響

(夏季(JJA)(左図), 冬季(DJF)(中図), 通年(右図))



図 6 世帯当たり電力消費量の実績値変化

(夏季(JJA)(左図), 冬季(DJF)(中図), 通年(右図))

#### (2) 都市ガス・LPG

都市ガス及び LPG の気象影響を図 7、実績値変化を図 7 に示す。両燃料種とも暖房用途での利用が多いため、気象影響も夏季で小さく、冬季で大きい特徴を示している。東北地方において気象影響と実績値の変動に若干の齟齬が生じているものの、その他の地域においては概ね変動が一致した。

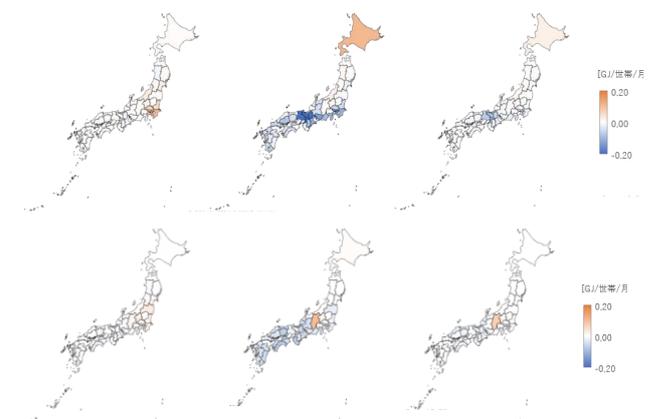


図 7 世帯当たり都市ガス・LPG 消費量への気象影響

(都市ガス(上段), LPG(下段), 夏季(JJA)(左図), 冬季(DJF)(中図), 通年(右図))

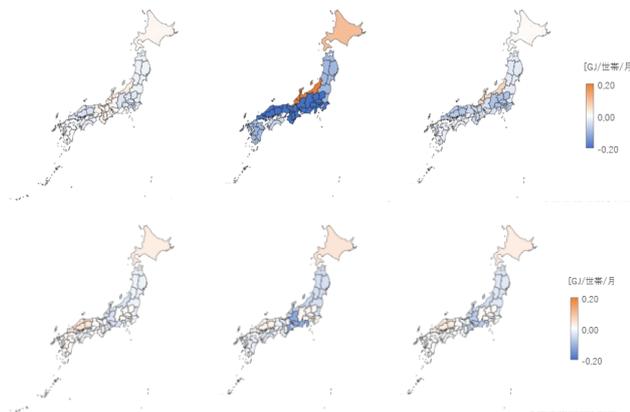


図 8 世帯当たり都市ガス・LPG消費量の実績値変化  
(都市ガス(上段), LPG(下段), 夏季(JJA)(左図), 冬季(DJF)(中図), 通年(右図))

### (3) 灯油

灯油の気象影響を図 9, 実績値変化を図 10 に示す。灯油の主な利用用途は暖房用途であり, 他の燃料種と比較し実績値と気温影響の間には強い相関関係が現れると考えられる。しかし, 本推計では東日本以北において真逆の傾向を示した。補正方法に起因する都市ガスやLPGの月次変動からの影響, 灯油推計モデルの精度等に原因があると考えられる。



図 9 世帯当たり灯油消費量への気象影響  
(夏季(JJA)(左図), 冬季(DJF)(中図), 通年(右図))



図 10 世帯当たり灯油消費量の実績値変化  
(夏季(JJA)(左図), 冬季(DJF)(中図), 通年(右図))

## 4. 考察

### 4.1 環境省調査との比較

2050年カーボンニュートラルを目指す上で, 電化の促進や電源の脱炭素化が強く求められている<sup>2)</sup>。家庭部門においても電力需要が拡大すると見込まれており, 今後, 電力への気象影響の把握が益々重要になる。そこで本節では, 2つの異なる推計手法で推計された気象影響を比較し, 手法

ごとの差異について整理する。

環境省が公開している「温室効果ガス排出インベントリ」では家庭部門における対前年度排出量変化を特定するため, 地方10区分別燃料種別に気象影響を推計している<sup>5)</sup>。気象影響は, 気温感応度, 世帯数及び月平均気温偏差の積で計算され, 気温感応度は世帯当たりエネルギー消費量と月平均気温の回帰係数として得ている<sup>8)</sup>。

両調査における夏季, 冬季の気象影響を図 11 示す。夏季に着目すると, 大まかな傾向は一致しており, 推計手法による大きな差異は生じていない。一方, 冬季をみると, 東日本以北の気象影響は, 本推計で増加, 環境省調査では減少を示している。環境省調査で使用される気温感応度は気温と燃料消費量の単純な回帰式から算出されており, 降雪量や風速, 他燃料種とのシェアといった要因を十分に考慮できていない。そのため, 北海道地方において推計された気象影響が実測値変化と異なる変動を示したものと考えられる。一方, 本研究で得られた気象影響は東北地方で増加を示しているが, これは先述したとおり, 1月の気象影響の過大評価, または12月及び2月における気象影響の過小評価が原因だと考えられる。一般的に複雑な事象に関しては, 自由度の高い非線形モデルで予測精度が高くなる傾向にあるため, より正確な気象影響の評価のためには, 今後さらなる ANN モデルの改良が必要となる。

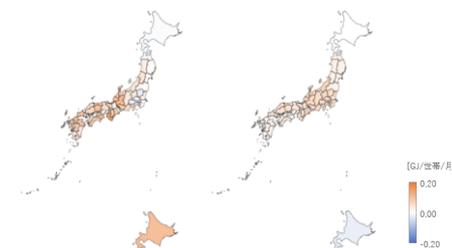


図 11 世帯当たり電力消費量への気象影響

((夏季(JJA)(左図), 冬季(DJF)(中図), 本調査(左側), 環境省調査(右側))

### 4.2 今後の応用

モデルの汎化性能がより改善された場合, 市区町村等により細かい地域における気象要因の推計や, 感度分析を利用した他特徴量の影響把握, 地球温暖化対策計画で実施されている各種対策の進捗評価等への転用が可能になる。そのためには, 先述した特徴量の再設定や学習サンプルの増加に加えデータの時系列性も学習する Recurrent Neural Network (RNN)の利用等を検討する必要がある。

## 5. まとめ

本研究では ANN モデルを用いた気象条件の変化に伴う世帯当たりエネルギー消費量への影響を定量的に分析した。以下では分析によられて得られた知見を列記する。

- 線形モデルと非線形モデルの予測精度を比較した結果、全ての燃料種において非線形モデルの予測精度が線形モデルを上回った。
- ANN モデルにおいて、電力、都市ガス、灯油の決定係数が 0.85 から 0.90 程度と高い精度を示した。一方、灯油の決定係数は約 0.75 と他燃料種と比較し精度が低く、原因としてサンプル数や特徴量の少なさが指摘された。
- 2017 年度から 2018 年度の世帯当たりエネルギー消費量のうち気象による影響を定量的に分析した。電力、都市ガス、LPG については、夏季・冬季ともに概ね実際のエネルギー消費量と整合した変動を見せた。
- 一方、灯油の気象影響を推計した結果、東日本や北日本を中心に、実際のエネルギー消費量と真逆の変動を示した。原因として灯油を推計する ANN モデルの精度が他燃料種と比較し低いこと、購入量を消費量に変換する際、都市ガスや LPG の変動に影響を受けていること等が考えられる。
- ANN モデルの汎化性能が改善された場合、削減ポテンシャルの大きい特徴量の把握、地球温暖化対策計画で実施されている各種対策の進捗評価を行うことが可能である。
- なお、ANN モデルの精度改善には特徴量の選定や学習サンプル数の増加、データの時系列性も学習する RNN の利用等が考えられる。

## 謝辞

本研究はエネルギー・資源学会主催の「家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査利用研究会」における取組の一環として実施したものである。また、分析に使用した「家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査」の統計データも、同研究会を通じて提供頂いたものである。ここに記し、感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 地球温暖化対策推進本部; 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(2020 年 6 月 11 日)
- 2) 「第百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説」(2020 年 10 月 26 日)
- 3) 環境省; 「地方公共団体における 2050 年二酸化炭素排出実質ゼロ表明の状況」
- 4) 日本経済団体連合会; 「チャレンジ・ゼロ」(2020 年 6

月 8 日)

- 5) 環境省; 「2018 年度(平成 30 年度)温室効果ガス排出量」(2020 年 4 月)
- 6) Hirano, Yujiro, et al. "Analysis of the impact of regional temperature pattern on the energy consumption in the commercial sector in Japan." *Energy and Buildings* 149 (2017): 160-170.
- 7) 下田吉之, et al. "都市家庭部門エネルギー最終需要モデルの検証と気温上昇影響." *エネルギー・資源* 27.6 (2006): 431-437.
- 8) 環境省; 「平成 30 年度温室効果ガスインベントリを活用した地球温暖化対策の促進方策検討等委託業務」
- 9) Biswas, MA Rafe, Melvin D. Robinson, and Nelson Fumo; "Prediction of residential building energy consumption: A neural network approach." *Energy* 117 (2016): 84-92.
- 10) Aowabin Rahman, Vivek Srikumar, and Amanda D. Smith; "Predicting electricity consumption for commercial and residential buildings using deep recurrent neural networks." *Applied energy* 212 (2018): 372-385
- 11) 田中昭雄, 小峯裕己, 関庸一, 三宅義彦. ニューラルネットワークによる住宅エネルギー消費構造モデルの研究, *空気調和・衛生工学会 論文集* 31(111), 9-17, 2006
- 12) 環境省; 「平成 29 年度 家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査 調査の概要」
- 13) 環境省; 「平成 30 家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査 調査の概要」
- 14) 地球温暖化対策推進本部; 「地球温暖化対策計画」(2016 年 5 月 13 日)
- 15) 瀧雅人; これならわかる深層学習 入門(2017)

# 家庭 CO2 統計の個票データと機械学習を用いた 使用エネルギー種別光熱費の実態把握

## Understanding the Expenditures by Purchased Energy using Micro Data of Survey on Carbon Dioxide Emissions from Residential Sector and Machine Learning

西尾 健一郎 \*

Ken-ichiro Nishio

### Abstract

This study analyzed the factors causing the difference in the amount of utility bill payments by purchased energy, using micro data of about 10,000 households. The analysis consisted of (1) building a model of gradient boosting decision tree, which is one of the machine learning techniques, (2) identifying contribution of each household and each feature using SHAP value, and (3) revealing the breakdown of differences on a macro level by aggregating each contribution. The results showed that differences in payments are brought about by a complex interaction of household, housing, heating/cooling, water heating, cooking, refrigerator, TV, lighting, appliances, region, and photovoltaics factors. It was also confirmed that payments can be reduced through the spread of heat pump water heaters and the shift from LP gas stoves to IH cooking heaters.

**Keywords** : Energy efficiency, Decarbonization, Water heating, Space heating, Machine learning, Electrification

### 1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向けては、電源の脱炭素化だけでなく、需要側で省エネと電化を進めていく必要がある。全電化住宅から都市ガスやLPガス、灯油を併用する住宅まで、使用エネルギー種別によって光熱費がどのような影響を受けるかを明らかにしていくことは、対策の社会的受容性に関する検討に資する。

光熱費には機器の実効率や利用スタイル、エネルギー単価などが複合的に作用するため、頑健な知見を得るためには、多数の世帯の実績データに基づき分析することが望まれる。その際には、使用エネルギー種別によって住宅・世帯属性などが偏ることへの対処も求められる。筆者は既報<sup>1)</sup>において、機械学習により属性を考慮に入れて光熱費を分析し、建築時期別による差異をもたらす要因を明らかにした。関連研究となる本報では、同じ分析手法を用いて、使用エネルギー種別光熱費の実態把握をする。

環境省が平成29年度より実施している、「家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査」(家庭CO<sub>2</sub>統計)では、世帯・住宅属性、家電・機器の保有・利用状況、各種エネルギー消費量・CO<sub>2</sub>排出量に加えて、光熱費支払額も把握されている。エネルギー・資源学会の「家庭部門のCO<sub>2</sub>排出実態統計調査利用研究会」では、温暖化防止へ貢献すべく、家庭CO<sub>2</sub>統計の個票データを利用することで、多様な視点で分析がされている。筆者らも、建築時期別の給湯機器・主暖房機器・台所用コンロのシェアや光熱費を分析してきた<sup>1,2)</sup>。本報では、平成30年度統計の全サンプルである9,996世帯の

個票データを用いる。なお、家庭CO<sub>2</sub>統計では、回答者が都市部へ偏る可能性があることを踏まえて、集計の際には都市階級別の世帯数による比例配分を行うこととしている。そのための重み付け係数は個票データに収録されているので、モデル構築時や分析時に考慮している。

### 2. 使用エネルギー種別による光熱費支払額の概要

#### 2.1 単純比較

図1によれば、対象世帯全体の平均的な年間光熱費支払額は17.4万円であり、その内訳は電気11.0万円、都市ガス3.0万円、LPガス2.1万円及び灯油1.3万円である。使用エネルギー種別は6種ある。単純比較によれば、合計支払額が最も多いのは電気・LPガス・灯油併用世帯の21.4万円であり、最も少ないのは電気・都市ガス併用世帯の15.4万円である。

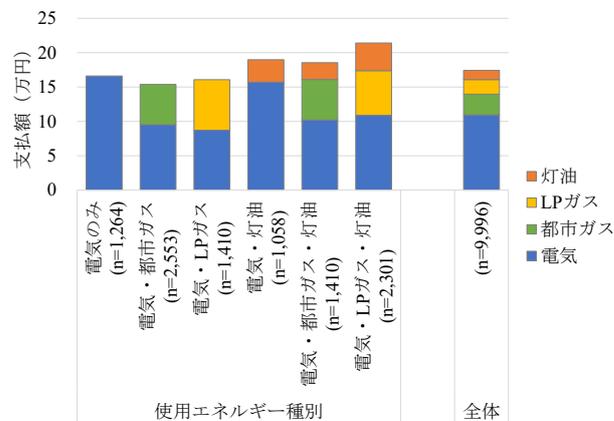


図1 使用エネルギー種別の光熱費支払額

#### 2.2 層別分析

実際には電化住宅は世帯・住宅規模が比較的大きいセグ

\*電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員  
〒100-8126 東京都千代田区大手町 1-6-1  
E-mail : nishio@criepi.denken.or.jp

メントから普及が進んでいるため、図1は属性に偏りがあるまま、比較をしたに過ぎない。そこで、図2で世帯人数を揃えた比較をすると、1人・2人・3人・4人以上世帯のいずれにおいても、支払額最少は電気のみ世帯になる。また、ガスについてはLPガス併用世帯より都市ガス併用世帯のほうが、灯油については併用世帯より非併用世帯のほうが、支払額は少ないことが示されている。

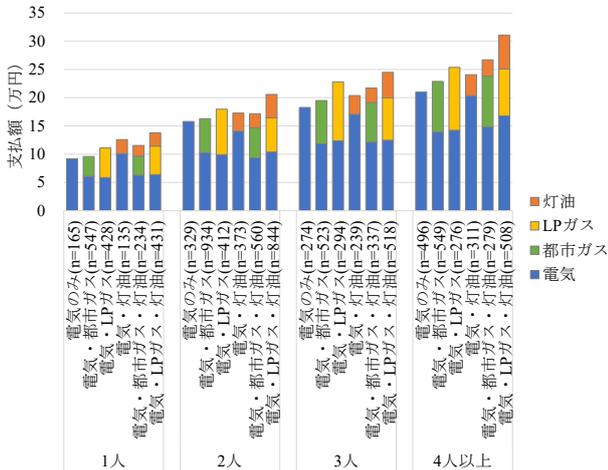


図2 世帯人数・使用エネルギー種別の光熱費支払額

このような層別分析を深掘りし、例えば住宅の建て方なども揃えて比較することで、ある程度は実態に接近できる。それでもなお、どの条件を揃えるべきか明確でない、気象のように揃えにくい条件がある、条件を絞って抽出するほどサンプル数が減少して結果が不安定になる、といった課題は残る。そこで3章以降では、条件を絞り込むことを避け、個票データの情報を最大限活用する分析方法を採用する。

ここで、世帯人数・使用エネルギー種別のエネルギー単価(=光熱費支払額の加重平均÷最終エネルギー消費量の加重平均)を図3で確認しておく。各エネルギーの特徴は次のとおりである。電気の単価(3.6倍することで円/kWhに換算可能)は、世帯人数によってそれほど変わらないが、電気のみ世帯と電気・灯油併用世帯で低くなる。それらには、電化住宅や電気式給湯機器向けの安価な電気料金メニューを契約している世帯が含まれるためである。都市ガスとLPガスについては、LPガスのほうが単価が高い点と、共に世帯人数が少ないほど単価が上昇する点が特徴的である。灯油の単価は、世帯人数や使用エネルギー種別によらず同程度である。

なお、例えばヒートポンプ技術のような高効率機器を使うことで、最終エネルギー消費量は減る。そのため、効率や利用スタイルを考慮する前の単価である図3は、ランニングコストの優劣をそのまま示すものではない。3章以降

の分析においては、最終エネルギー消費量やエネルギー単価のデータは用いず、支払額データを直接用いる。その際、上述の単価の違いは、理想的には分析結果に織り込まれると考えられる。

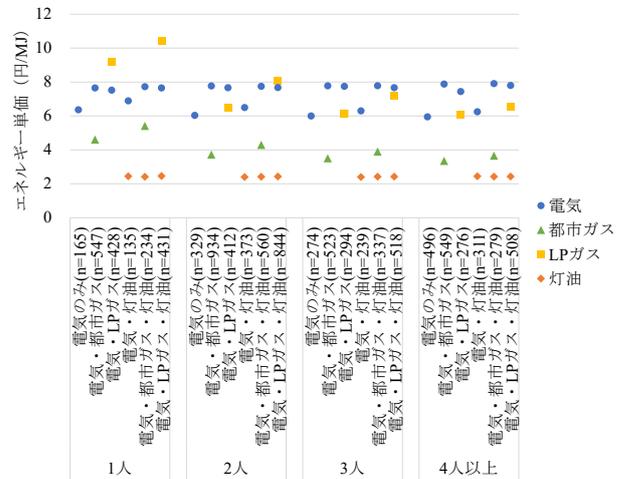


図3 世帯人数・使用エネルギー種別のエネルギー単価

### 3. 分析手法

#### 3.1 既報との違い

筆者は既報において、家庭CO<sub>2</sub>統計の個票データに基づき、(1)機械学習手法の1つである勾配 Boosting 木(Gradient Boosting Decision Tree, GBDT)を適用することで、世帯・住宅属性や機器保有・利用行動などの多数の特徴量から光熱費を推定するモデルを構築した上で、(2)機械学習の解釈可能性を高める手法のSHAP(SHapley Additive exPlanations)を応用することで、建築時期による光熱費差異に対する各種要因の寄与度を明らかにする手法を提案した。

既報では提案手法について、「比較軸は建築時期によらないし、目的変数も光熱費に限るものではない。分析内容に応じて手法をカスタマイズすることがそれほど求められないとすれば、効率的に知見を蓄積できる可能性がある」と付言した。本報ではその可能性を探るべく、手法のカスタマイズは避け、変更点を必要最小限にとどめる。具体的には、既報と本報の違いは、比較軸を建築時期から使用エネルギー種別へ置き換えた点と、それに伴って、分析対象世帯を建築時期不明の世帯を除く9,290世帯から全サンプルの9,996世帯へ増やして分析にかけた点に限られる。そのほかの要素、例えば分析フローや特徴量、要因の定義は同じであり、分析結果のまとめ方も既報に準拠する。

以上の理由により、特徴量や要因の定義を含む詳細は既報に譲り、3.2~3.4節では分析手法の概要を述べる。

#### 3.2 機械学習

目的変数である光熱費支払額を、住宅・世帯属性や機器

保有・利用状況などの特徴量で予測する GBDT モデルを構築する。

### (1) 目的変数

GBDT モデルの目的変数は、年間合計（2018 年 4 月～2019 年 3 月）の光熱費支払額（単位：万円）である。電気・都市ガス・LP ガス・灯油の 4 種の支払額の合計であり、ガソリン・軽油は含まない。太陽光発電の保有世帯において、売電に伴う受取額は反映されないが、自家消費に伴う支払額の減少は反映されている。

### (2) 特徴量

GBDT モデル構築時に投入する特徴量（説明変数）は 244 個である。更に、各特徴量を 11 の大分類と 40 の小分類からなる「要因」に関連付けている。

### (3) 勾配 Boosting 木（GBDT）モデルの構築

GBDT は機械学習手法の 1 つであり、勾配降下法・アンサンブル学習・決定木の組み合わせにより、目的変数を予測する。GBDT モデル構築にあたっては、予測精度の向上と過学習の抑制を目的として、対象サンプルの 80% をランダム抽出した上で、その中で 10 分割交差検証（CV, cross validation）により、グリッド探索でハイパーパラメータの値を決定した。これら値を用いて、対象サンプル全体で改めて 10 分割 CV により平均的な予測誤差を確認したところ、観測値と予測値の差の二乗平均値の平方根である RMSE（root mean squared error）は 5.13 万円、観測値と予測値の差の絶対値を平均した MAE（mean absolute error）は 3.70 万円、 $R^2$ （決定係数）は 0.691 であった。対象サンプル全体の GBDT モデルの学習誤差は、RMSE は 3.87 万円、MAE は 2.84 万円、 $R^2$  は 0.828 であった。

## 3.3 SHAP

機械学習は精度が高い手法として期待される一方で、ブラックボックス問題もしばしば指摘される。これに対して、説明可能性（解釈性）を高める手法も提案されており、その 1 つが、2017 年に提案された SHAP である<sup>3)</sup>。協力ゲーム理論において獲得利得を各プレイヤーに公平に分配する手法として Shapley 値が知られているが、これを応用した SHAP は、各特徴量が予測値に及ぼす影響を解釈するための手法である。

ここでは個票データと GBDT モデルから SHAP 値を算出し、モデル構造を解釈できるようにする。特徴量テーブルは 9,996 行×244 列であるから、得られる SHAP 値テーブルも 9,996 行×244 列である。ある特徴量の値が同じであっても、他の特徴量との相互作用により、世帯固有の SHAP 値が与えられる。244 個の SHAP 値の合計は、目的変数である支払額の当該サンプル予測値と全体平均値の差分に一致する。

## 3.4 要因分解

SHAP 値を世帯要因や太陽光要因といった分類で集約した上で、使用エネルギー種別による支払額差異の要因分解をする。

## 4. 使用エネルギー種別による光熱費支払額の差異

### 4.1 全体の要因分解

図 4 では、使用エネルギー種別による支払額の差異を、11 の要因で分解している。詳細は 4.2 節の各図で述べることにして、図 4 では 3 点に着目して全体を概観する。

第 1 に、灯油に着目すると、使用エネルギーに灯油を併用する世帯（図中の右側の 3 種）の支払額は、灯油を併用しない世帯（左側の 3 種）よりも数万円多い。しかし、この差は単純比較によるものであり、両者の属性は大きく異なるため、灯油を使用することで支払額が増えるといったような因果関係を示すものではない点に注意を要する。この課題に対応するのが要因分解であり、灯油併用世帯は人数が多い、広くて古い戸建住宅や気温が低い地域に住むことが多いといったように、属性に起因する影響が大きいことがわかる。

第 2 に、ガス種別による違いである。灯油の併用世帯間もしくは非併用世帯間で単純比較をすると、LP ガス併用世帯の支払額は、都市ガス併用世帯より多い。要因分解によれば、LP ガス併用世帯ではコンロ要因と給湯要因のプラス寄与が大きい点が特徴的である。その主たる理由として、前掲図 3 で確認した LP ガス・都市ガス間の単価差がある。

第 3 に、都市ガスの併用有無についてである。合計値の単純比較によれば、電気のみ世帯の光熱費は、電気・都市ガス併用世帯を上回る。要因分解によれば、背後には世帯要因や住宅要因、それらにも関連する冷暖房要因などのプラス寄与があり、一方で、使用エネルギーの影響を受けやすい給湯要因とコンロ要因についてはマイナス寄与をしている。また、電気のみ世帯では太陽光要因もマイナス寄与をする。

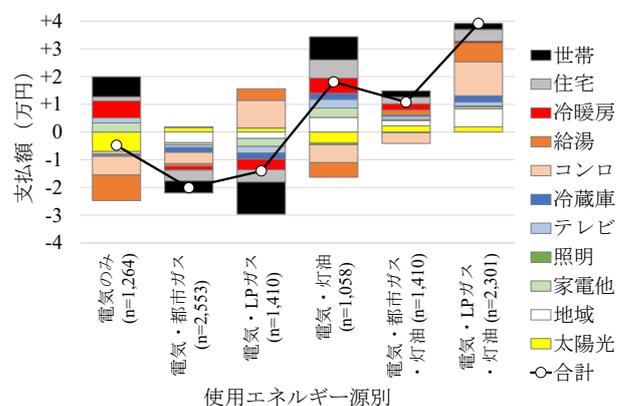


図 4 光熱費支払額の差異の要因分解

## 4.2 各要因の詳細

次に、11 要因の各々について、小分類で内訳を明らかにする。本報では、解釈を深める目的で、特徴量の例（有効データの平均値）を図中に併記し、適宜補足する。

世帯要因（図 5）は、電気のみ在世帯と電気・灯油併用世帯でのプラス寄与が大きく、世帯人数の多さが背景にある。逆に、電気・LP ガス併用世帯や電気・都市ガス併用世帯では、世帯人数が少ないことによるマイナス寄与が見られる。灯油を併用する世帯は年齢層が高めであり、世代によるプラス寄与が若干見られる。

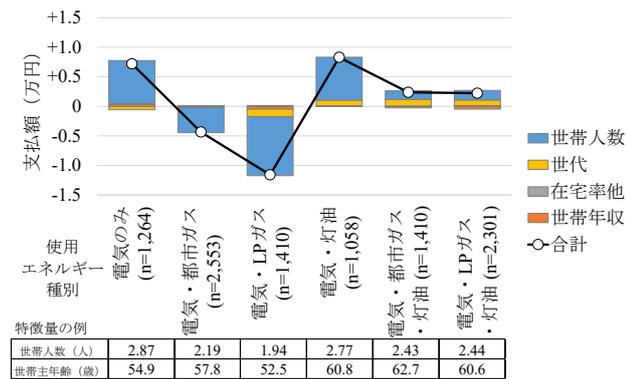


図 5 世帯要因

住宅要因（図 6）については、LP ガスや都市ガスを併用する世帯は、戸建比率が低め・平均延床面積が小さめであり、ガスを併用しない世帯より支払額が減る要因になっている。灯油を併用しない世帯やガスを併用しない世帯、中でも電気のみ在世帯では、建築時期が新しいこともあり、住宅断熱性能の向上などにより支払額が相対的に抑えられている。

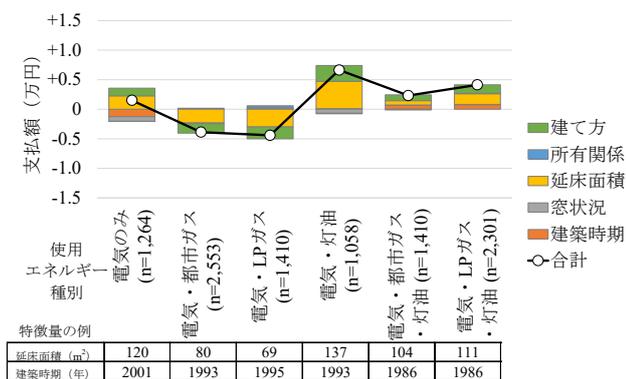


図 6 住宅要因

冷暖房要因（図 7）については、電気のみ在世帯や電気・灯油併用世帯でプラス寄与が大きい。それら世帯ではエアコン台数が多く、暖房時間も長い。一方、電気・LP ガス併用世帯では、エアコン台数が少なく暖房時間も短いなどにより、マイナス寄与が大きい。灯油を併用しない世帯では、

暖房機器要因がマイナス寄与をするが、暖房機器としてエアコンが選択される比率が高いこともその背景にある。

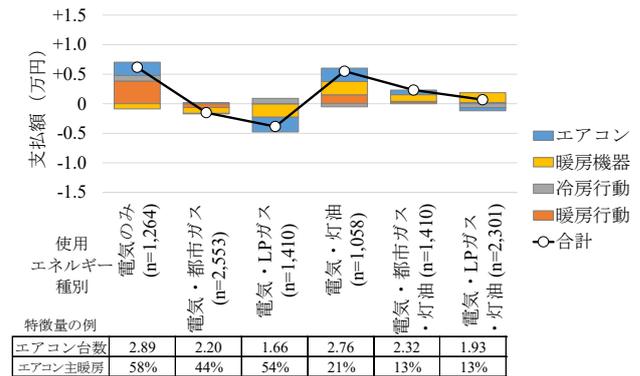


図 7 冷暖房要因

給湯要因（図 8）は機器によって大きく左右される。電気のみ在世帯と電気・灯油併用世帯では、浴槽湯はりの多さといった入浴行動によるプラス寄与も見られるが、ヒートポンプ（HP）給湯機の保有比率が他より高く、マイナス寄与が大きい。一方、LP ガスを併用する世帯では、給湯機器によるプラス寄与が大きい。

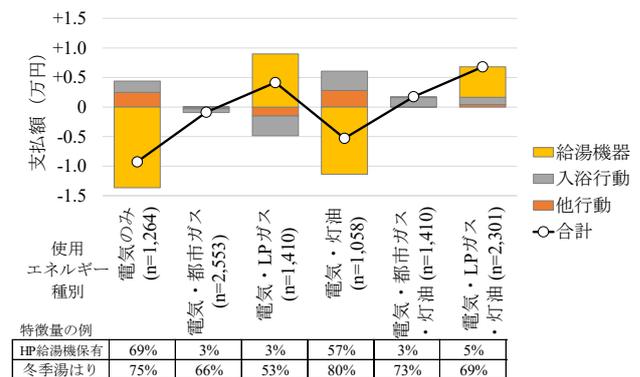


図 8 給湯要因

コンロ要因（図 9）も機器選択の影響が支配的である。大半が IH キッキングヒーターを保有する、電気のみ在世帯と電気・灯油併用世帯では、マイナス寄与が大きい。ガス併用世帯では、9 割以上が都市ガスないし LP ガスコンロを保有する。都市ガス併用世帯ではマイナス寄与をするが、LP ガス併用世帯ではプラス寄与が大きく、エネルギー単価の影響が大きいと考えられる。なお、灯油はコンロに使われないので、その併用有無はコンロ要因を左右しないと予想されるが、概ねそのような結果になっている。

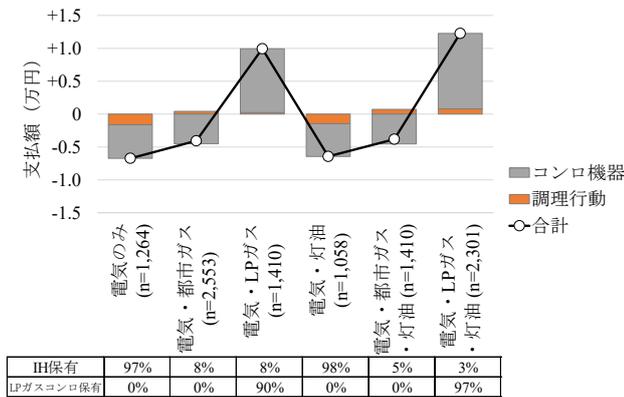


図9 コンロ要因

冷蔵庫要因(図10)については、灯油を併用する世帯でプラス寄与が見られ、冷蔵庫の台数の多さなどが影響している。一方、電気・LPガス併用世帯では冷蔵庫のサイズが小さめになることも、マイナス寄与の一部になっている。

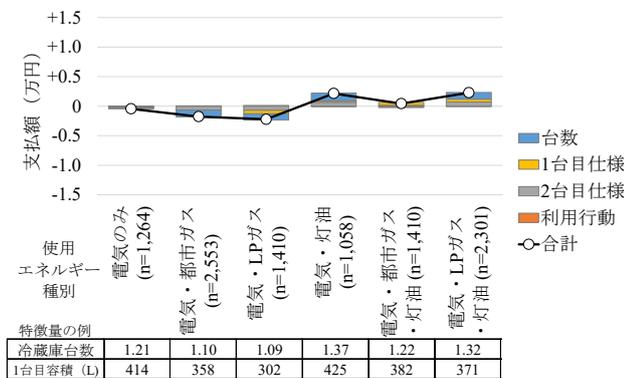


図10 冷蔵庫要因

テレビ要因(図11)は、電気・灯油併用世帯ではプラス寄与が、電気・LPガス併用世帯ではマイナス寄与が見られる。主たる理由はテレビ台数の違いである。また、電気だけの世帯と電気・灯油併用世帯では、画面サイズが大きめといった仕様要因のプラス寄与が見られる。

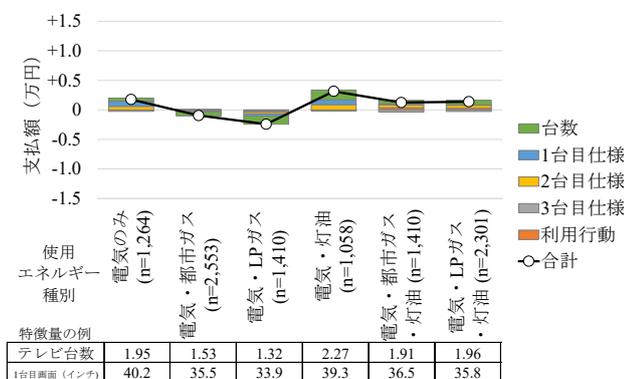


図11 テレビ要因

照明要因(図12)は、使用エネルギー種別で比較する限りにおいては、他の要因と比べて差異が小さい。電気・灯

油併用世帯と電気だけの世帯は、居間でLEDが使われる比率が若干高いことなどが作用し、マイナス寄与が僅かに見られる。既報では、近年建てられた住宅でLED化の効果が顕著に見られた。本報の結果は、全体的に効果が及んでいて、差としては目立たないと解釈するほうが適切であろう。

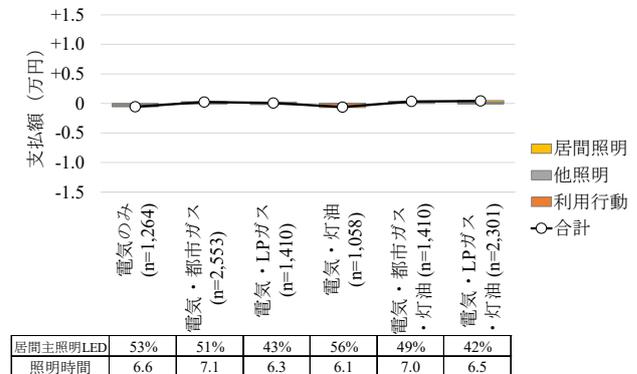


図12 照明要因

家電他要因(図13)は、電気だけの世帯や電気・灯油併用世帯でプラス寄与が大きい。温水洗浄便座や食洗乾燥機、洗濯乾燥などの利用機会が多いことが背景にある。

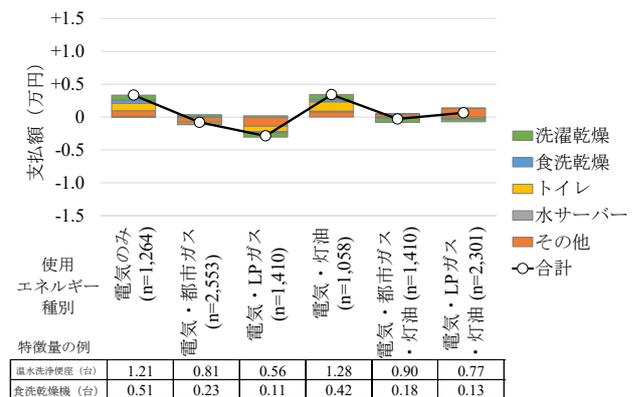


図13 家電他要因

地域要因(図14)は、灯油併用世帯は、平均気温が他より低い地域に住むことが多く、主には冬の暖房・給湯負荷が大きくなることによるプラス寄与と解釈できる。

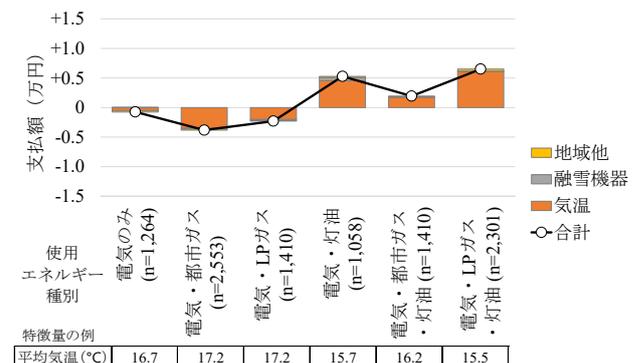


図14 地域要因

太陽光要因（図 15）は、特に電気のみでマイナスイ寄与が大きい。他と比べて設置率が高く、容量も大きめであることが作用している。

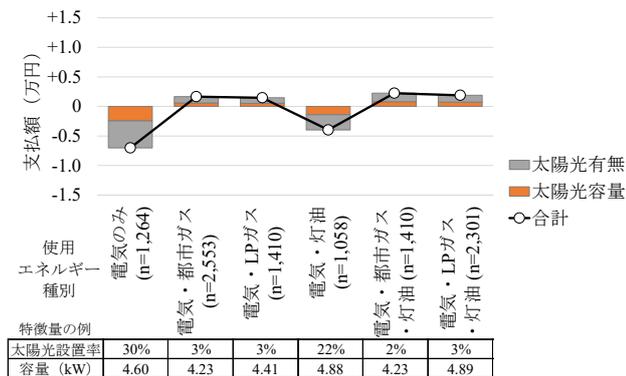


図 15 太陽光発電要因

## 5. おわりに

本報では、温暖化対策の検討に資することを目的として、家庭 CO<sub>2</sub> 統計の個票データを用いて、使用エネルギー種別の光熱費支払額の差異について分析した。

まず、簡単な集計をした上で、詳細分析の必要性を指摘した。

- 住宅でどのエネルギー（電気・都市ガス・LP ガス・灯油）を使うかによって、光熱費は左右されるが、世帯・住宅規模などの条件が異なる単純比較から言えることには、限界がある。
- 例えば世帯人数を揃えて比較すると、電気のみを使用する世帯の光熱費が最も少ないことなどがわかる。他方、複数の条件を揃えることは容易でなく、どの要因がどの程度影響しているかも明らかにはできない。

次に、詳細分析を行った。分析にあたっては、9,996 世帯の年間合計支払額及び 244 個の特徴量データを用いた。既報で提案した分析手法に基づき、(1) 機械学習手法の 1 つである勾配 Boosting 木によるモデル構築、(2) 機械学習の解釈可能性を高める手法である SHAP 値を用いて各世帯・各特徴量の寄与度をミクロ的に同定した上で、(3) 寄与度を集約することでマクロ的な実態把握を行った。主な結果は以下の通りである。

- 使用エネルギー種別による光熱費の違いは、世帯・住宅・冷暖房・給湯・コンロ・冷蔵庫・テレビ・照明・家電他・地域・太陽光発電要因が複雑に作用してもたらされたものである。
- 例えば電化住宅では、使用エネルギーとは別の理由で左右されやすい要因として、世帯人数が多い、延床面積が大きい、温水洗浄便座・食洗乾燥機やテレビなど

が多いといったプラス寄与もあれば、建築時期が新しいことによる住宅断熱性能向上のマイナス寄与の可能性も示唆される。太陽光発電の設置率の高さによるマイナス寄与もある。

- 使用エネルギー種別に左右されやすい給湯要因やコンロ要因を比較することで、ヒートポンプ給湯機の普及や、LP ガスコンロから IH クッキングヒーターへのシフトにより光熱費が抑えられる。

最後に、分析手法の期待と課題について述べる。前報は建築時期別、本報は使用エネルギー種別と、異なる比較軸で分析したが、結果がとりわけ不安定になることはなかった。「分析内容に応じて手法をカスタマイズすることがそれほど求められないとすれば、効率的に知見を蓄積できる可能性がある」という、既報で寄せた期待を、ある程度は確認できたといえる。一方、データは共通で分析内容も似ているだけに、課題が体系的に顕在化していない可能性も否定できない。分析精度の向上のような既報で述べた課題を含めて、知見を蓄積していく必要があるし、より正確には各機器の実測データなどに基づく結果とあわせて、イニシャルコストを含む費用対効果も考慮しながら、温暖化対策の検討を進めていく必要がある。

## 謝辞

本研究は、エネルギー・資源学会の「家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査利用研究会」のメンバーとして、実施した。平成 30 年度家庭 CO<sub>2</sub> 統計の実施に尽力された環境省や委託事業者であるインテージ・住環境計画研究所、学会・研究会の関係者の皆様に、この場を借りて御礼申し上げる。なお、本分析の結果にかかる責任は筆者が負う。

## 参考文献

- 1) 西尾健一郎; 家庭 CO<sub>2</sub> 統計の個票データと機械学習を用いた建築時期別光熱費の実態把握, エネルギー・資源学会論文誌, 42-3, (2021), pp.175-184.
- 2) 西尾健一郎, 中野一慶; 家庭 CO<sub>2</sub> 統計の個票データを用いた給湯機器の保有実態などに関する基礎検討, 第 39 回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集, (2020), pp.244-249.
- 3) Lundberg, S.M., and Lee, S.-I.; A unified approach to interpreting model predictions, Advances in Neural Information Processing Systems, (2017).

# 家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出量の地域性とその影響要因に関する統計分析

## Statistical Analysis on Regional Characteristics CO<sub>2</sub> Emission from Residential Buildings

長谷川 兼一\*・外岡 豊\*\*  
Kenichi Hasegawa Yutaka Tonooka

Home energy saving strategies are essential to prevent global warming and achieve carbon neutral society. This paper describes the regional characteristic of indoor environmental performance and annual CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption from home and automobiles using the data of “Statical Survey of CO<sub>2</sub> Emissions in Private Households Sector”. A multi-regression analysis method was applied in order to clarify the association between CO<sub>2</sub> emissions and energy consumption for space heating, and its influencing factors such as location, family type, building thermal envelope and so on. The factors which influence the dispersion of annual energy consumption for space heating are location, floor area, family type, operating patterns of space heating equipment, numbers of window panes.

**Keywords** : Home energy consumption, CO<sub>2</sub> emission, Energy consumption for space heating, Statistical analysis

### 1. はじめに

平成 30 年に環境省により実施された「家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査(家庭 CO<sub>2</sub> 統計)」により得られたデータを用いて、家庭部門のエネルギー消費量や CO<sub>2</sub> 排出量の地域特性に着目する。本報では、CO<sub>2</sub> 排出量と暖房エネルギー消費量のばらつきに関連している要因を数量化理論 I 類により分析した。

### 2. 分析に用いる調査データの概要

本調査は、住民基本台帳から抽出された 6,500 世帯を対象とした調査員調査と、6,500 世帯を対象としたインターネット調査から成り立っている。有効回答数は 9,996 世帯(回答率は 76.9%)であった。調査の詳細は文献 1)を参照されたい。

### 3. 年間の CO<sub>2</sub> 排出量と暖房エネルギー消費量

図 1 に、各地域における年間の用途別 CO<sub>2</sub> 排出量の平均値を示す。CO<sub>2</sub> 排出量には、自家用車と二輪車による分も含まれている。全国では、家庭部門の年間 CO<sub>2</sub> 排出量が 3.5 t-CO<sub>2</sub>/year, 自家用車・二輪車を含めると 5.0 t-CO<sub>2</sub>/year になり、自家用車等が全体の 30%を占める。家庭部門では、照明・家電が全体の 46.5%を占め、暖房、給湯は 20%程度の割合となる。北陸は暖房の他に自家用車等が多く、北海道が暖房が最も多く、次いで、東北、北陸となる。照明・家電には地域差が見られるが、CO<sub>2</sub> 排出係数の影響が大きいと推察される。

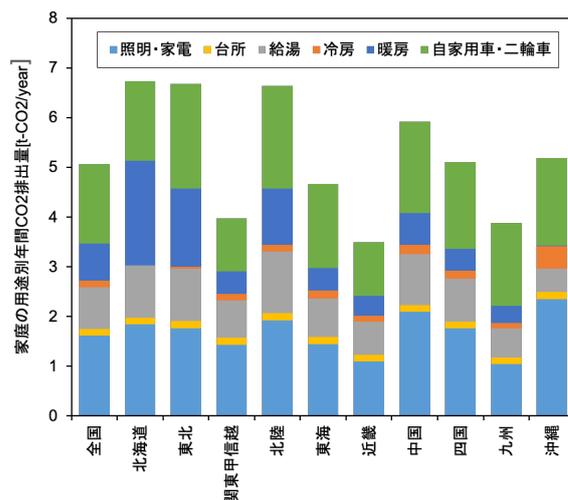


図 1 各地域における用途別の年間 CO<sub>2</sub> 排出量

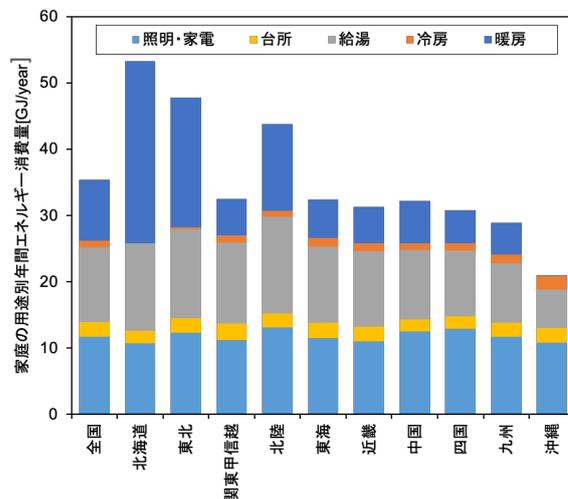


図 2 各地域における用途別の年間エネルギー消費量

\*秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科教授  
〒015-0076 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4

E-mail : haseken@akita-pu.ac.jp

\*\*埼玉大学名誉教授

図 2 に、各地域の用途別エネルギー消費量(2次)の平均値を示す。エネルギー消費量の地域差は、暖房用が大きく影響していると考えられる。九州や沖縄では給湯用が小さいが、水道水温度や入浴習慣が影響していると推察される。

#### 4. 年間エネルギー消費量に寄与する要因の分析

##### 4.1 概要

年間エネルギー消費量(全用途, 暖房用)のばらつきに及ぼす要因を把握するために、数量化理論 I 類(量的データである目的変数をカテゴリーデータから成る説明変数で予測するための手法)による分析を行った。目的変数は、全用途の年間エネルギー消費量(図 3)と暖房エネルギー消費量(図 4)とし、説明変数にはそれに関連が深いと考えられる因子を選んだ。サンプル数はデータに欠落のない 7,789 世帯である。地域性の反映のため、所在地の市町村をもとに省エネルギー基準の地域区分(以降、地域区分)に割り付けた。

##### 4.2 全用途の年間エネルギー消費量の分析結果

図 3 に示す全用途の年間エネルギー消費量の説明変数には地域区分と家族類型を用いた。全用途の消費量のばらつきには家族類型の寄与が相対的に大きい。カテゴリー・ウェイトは「3 世代世帯」が最大、「65 歳未満の単身者」が最小となり、その差は 42.8GJ である。地方区分では、「2 地域」と「3 地域」で大小関係が逆転しているが、図 2 を見ると給湯用が影響している可能性がある。

##### 4.3 暖房エネルギー消費量の分析結果

図 4 に暖房用エネルギー消費量の結果を示す。暖房用のばらつきに対しては「地域区分」の寄与が最も大きく、偏相関係数は 0.56 である。地域区分は暖冷房デグリーデーや日照条件に基づいて分類されているため、暖房用を説明する変数として妥当な結果である。次いで、延べ床面積、暖房の仕方の偏相関係数が大きく、暖房用に影響している。住宅の断熱性能に関わる因子である二重サッシ、複層ガラスの有無の影響は小さく、偏相関係数は 0.08 であった。「なし」の方がカテゴリー・ウェイトは大きくなる傾向は若干見られるものの、他の要因と比較するとその影響は極めて小さい。断熱性能の向上は、住宅の省エネルギー化を推進する上で不可欠であるが、全国規模のデータを分析対象とした場合には、その影響が小さくなっている。断熱性能が向上すれば暖房計画も整えられるため、暖房時間や暖房面積が増えることが多い。今回の結果では、暖房の仕方の影響を加味しても、二重サッシ等の使用によるエネルギー消費量の低減が確認できたため、断熱性能向上による省エネルギー効果には一定の期待ができると考えられる。

##### 5. おわりに

平成 30 年の「家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査(家庭 CO<sub>2</sub> 統計)」のデータを用いて、エネルギー消費量のばらつきに関連する要因を数量化理論 I 類により分析した。その

目的変数: 家庭の年間エネルギー消費量 (平均: 37.5 GJ/year, 標準偏差: 20.9 GJ/year)  
 サンプル数: 7,789 世帯, 重相関係数: 0.63, 決定係数: 0.40

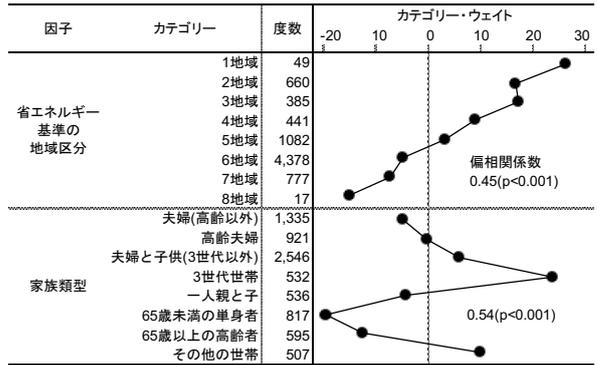


図 3 年間エネルギー消費量に及ぼす地域と家族類型に関する数量化理論 I による分析結果

目的変数: 家庭の暖房エネルギー消費量 (平均: 10.5 GJ/year, 標準偏差: 12.9 GJ/year)  
 サンプル数: 7,789 世帯, 重相関係数: 0.70, 決定係数: 0.49

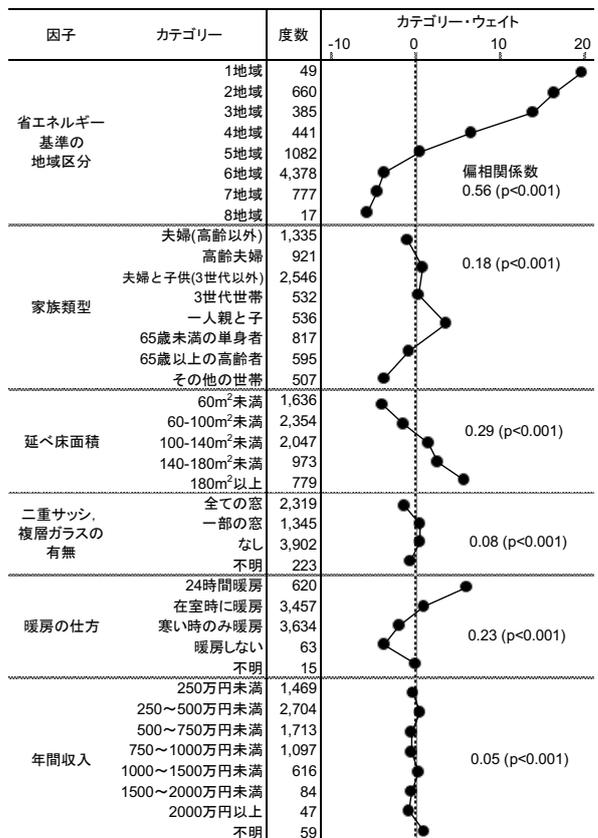


図 4 暖房エネルギー消費量に及ぼす居住環境要因に関する数量化理論 I による分析結果

結果、地域区分や家族類型の影響が相対的に大きいことが示された。暖房用に対しては、二重サッシ等の使用による省エネルギー効果が認められるものの、全国規模の分析においては、その影響度は小さいことを確認した。

##### 謝辞

ここで使用したデータは、調査票情報の提供に係る申請を経て提供されたものである。関係各位に多大なる協力をいただいている。ここに記して謝意を表する次第である。

##### 参考文献

- 1) 環境省: 家庭部門の CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査(家庭 CO<sub>2</sub> 統計). <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html>