

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760550

研究課題名(和文)人間行動に基づく都市圏民生・旅客交通エネルギーモデルの開発

研究課題名(英文)Development of urban-scale energy demand model for residential, commercial and transportation sectors considering human behavior

研究代表者

山口 容平 (Yohei, Yamaguchi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40448098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は近畿圏における民生家庭・業務部門、旅客交通部門のエネルギー需要を推計するモデルを開発した。各部門では住宅、業務施設、交通トリップを推計単位とし、計算対象地域の住宅、業務施設、トリップを複数の類型に分類し、各類型を代表する住宅、業務施設、トリップモデルを作成する。これを代表モデルと呼び、代表モデルを対象とするシミュレーションを行い、世帯・延床面積・トリップ当たりのエネルギー需要原単位を算出する。最後に、原単位と各類型の世帯数、延床面積、トリップ数の積和をとり、地域全体のエネルギー需要として定量化する。なお、各部門の関係性を考慮するため、住宅内生活行動、交通行動のモデルを開発した。

研究成果の概要(英文)：This research developed an urban-scale energy demand model for the residential, commercial and transportation sectors of Keihanshin Metropolitan region, Japan. The procedure of model development is described in the following steps: The building stock and transportation trips are divided into several categories according to the building/trip characteristics, and an archetype model, representative of a particular building/trip category, is developed. The unit energy consumption for each category is next quantified by conducting energy demand simulations by using the archetypes as input. Finally, the total energy demand is quantified by multiplying the unit energy demand by the number of units in each stock/trip category. In order to consider relationship among the sectors, a stochastic behavior model of residential occupants was developed. Together with the transportation model, the result was used to estimate movement of people and to assume commercial building users' behavior.

研究分野：エネルギー工学

キーワード：生活行動 エネルギー モデル開発 民生部門 交通行動

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化、化石燃料枯渇問題を背景に二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出抑制、化石燃料の使用削減が強く求められている。特に日本では、民生(家庭・業務)・交通部門のCO<sub>2</sub>排出の増加が著しく、大幅削減のための多様な方策が提案されている。一方、長期的には人口が減少していくと予想されており、現在のエネルギーシステムの前提である都市ストックの配置、それを結ぶ交通システムの在り方が大きく変わることが予想される。地域によってはこれまで増加を続けてきた住宅の戸数や業務建築床面積、交通需要が減少に転じることも想定されている。

このような背景から、都市に集積する機器、住宅、建築ストックの更新に合わせて、最新エネルギー消費機器への置換えや技術代替、各種省エネルギー技術の普及、さらには、上記のような社会環境の変化を契機として、都市構造のマネジメント(エネルギー消費、CO<sub>2</sub>排出量の少ないストック集積パターンの形成、建築ストックの削減)やライフスタイル・行動様式の変化などの多様な対策の導入を考慮し、CO<sub>2</sub>排出量、化石燃料使用を大幅に削減する低炭素社会構築シナリオの検討を行うことは重要な課題である。

一方、このような検討を行うためには、方法論上の問題がある。過去、都市・都市圏のエネルギー需要、CO<sub>2</sub>排出量のモデル化に関する研究は多数行われているが、都市・都市圏の単位で、3つの部門を包括的に扱った方法論は十分に開発されていない。また、複数の部門を統合的に扱った研究であっても(中井・森本 2008, Ravetz, Meacher 2000 など)、都市における活動量当たりのエネルギー消費量を外的に与えるなど、モデルが過度に簡略化されており、多様な対策の導入効果を定量化するには十分ではない。この方法論上の問題を解決するためには、次に示す要件を満足するモデルの開発が必要であると考えた。

- ① 個々の住宅、業務施設、旅客交通の単位ではエネルギー需要が決定される構造そのものが適切に再現される。
- ② 地球温暖化等の社会の問題の単位でエネルギー需要、CO<sub>2</sub>排出量を議論するため、都市や都市圏の空間スケールで住宅・建築ストック、旅客交通トリップの存在量とその多様性を考慮してエネルギー需要を推計することができる。

### 2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、近畿圏(京都府、大阪府、滋賀県、和歌山県、奈良県、兵庫県)を対象として、上記の要件を満足するエネルギー需要モデルを開発することを目的とした。

### 3. 研究の方法

開発したエネルギー需要モデルでは住宅、業務施設、旅客交通とトリップをそれぞれ計算

単位とし、図1に示す方法でモデルを開発した。

ステップ2における代表モデルの設計とステップ3における計算によって①の要件を満足した上で、世帯、業務施設床面積、旅客交通トリップ当たりのエネルギー需要を推計することができる。また、ステップ1による類型化、ステップ4における積み上げを行うことによって、②の要件を満足することができる。加えて、民生家庭、業務部門、旅客交通部門のエネルギー需要を推計することにより、これまで別々に扱われることが多かった3部門を統合的に扱い、都市活動に伴うエネルギー消費量を定量化・分析することができる。また、どのような属性を持つ人間が何のためにどれだけエネルギーを消費しているのか、人の行動を中心としてエネルギー需要の定量化が可能である。

**1. 住宅・業務施設ストック、旅客交通トリップの類型化** エネルギー需要に大きな影響をもつ属性に基づいてストック、トリップを類型化する。類型化には家庭部門では世帯構成、住宅仕様など、業務部門では用途・規模など、旅客交通部門では出発・到着地域と交通手段を考慮した。住宅は世帯数、業務部門は延床面積、旅客交通部門はトリップ数を類型別に定量化する。

**2. 代表モデルの設計** 各類型を代表する世帯・業務施設・旅客交通とトリップのモデル(代表モデル)を設計する。

**3. 類型別エネルギー需要原単位の推計** 代表モデルを入力条件としてシミュレーションを行い、エネルギー需要を推計する。ここで得られたエネルギー需要を原単位化し、代表モデルに対応するストック類型のエネルギー需要原単位とする。

**4. エネルギー需要の積み上げ** 各類型のエネルギー需要原単位と世帯数・延床面積・トリップ数の積をとり、各類型に含まれるストック、トリップのエネルギー需要を定量化する。得られたエネルギー需要をすべての類型について合計し、対象とする地域全体のエネルギー需要として定量化する。

図1 エネルギー需要モデル開発手順

### 4. 研究成果

以下ではまず各部門のモデルの概要を説明し、モデルを用いたケーススタディを示す。(1) 家庭部門

前述のように、家庭部門のエネルギー需要モデルでは住宅1世帯をエネルギー需要推計の単位としている。対象とする2府4県には2010年時点で860万世帯が居住しているが、本モデルでは5千世帯に縮約し、それぞれを代表モデルとして具体的な条件を設定し、5分タイムステップでエネルギー需要を推計する。ストックの類型化は気象条件(府県で区分)、世帯構成、住宅の仕様(集合・戸建の別および断熱性能)により実施し、国勢調査や建築仕様に関するストックモデルに基づいて計算対象地域の住宅全体を縮約するように、それらの条件を5千の代表モデルに与えた。なお、これらの情報に基づいて住宅

のエネルギー需要推計に必要な条件、①住宅居住者の生活行為、②行為に伴う住宅機器・設備の操作、③機器・設備の仕様、④機器・設備の所有状況、⑤住宅仕様（間取りや部材の構成等を含む）、⑥気象条件を与えた。次に、以下に説明するモデルにより代表世帯 5 千世帯分のエネルギー需要を得た。これを世帯当たりのエネルギー需要原単位とし、最後に、各代表世帯に縮約された世帯数とエネルギー需要推計結果の積和をとり、対象とする 2 府 4 県の住宅ストックのエネルギー需要を推計した。

代表モデルによりエネルギー需要を推計するために必要な情報が与えられる。この情報に基づいて計算対象期間における各代表モデルのエネルギー需要を推計する。本モデルの特徴は住宅居住者の生活行為を確率モデルにより決定している点にある。ここでの生活行為とは、睡眠や食事などの時間の使い方に対応するものである。モデルの入力データは人々の時間の使い方を示す生活時間データを統計情報として集計したものであり、今回は平成 18 年度に行われた社会生活基本調査を生活時間データとして使用した。この過程においてはデータ整備に用いる生活時間データ個票を年齢、性別、ライフステージ、就業の有無などの属性によって分類し、エネルギー需要の推計を行う対象世帯の家族構成に応じて対応する分類の生活時間情報を与え、対象地域に立地する住宅内の生活行動のばらつき、分布を考慮できるようにした。本モデルでは生活行為を毎日定型的に行う睡眠、食事、仕事のようなルーチン行為とそれ以外の非ルーチン行為に分類しており、上記の 24 時間の枠への配置はルーチン行為から優先的に行われる。ルーチン行為はその開始時刻、終了時刻、継続時間数の頻度分布に基づいてランダムに生成される。これをまず一日のタイムライン上に配置する。なお、ここで複数の在宅者が同時に食事をとる、入浴は別々に行うなど、家族としての相互作用を考慮している。以上でルーチン行為のみが配置された一日のタイムラインが完成する。次に、非ルーチン行為によりルーチン行為の間の空白を埋める。まず、ルーチン行為終了後、ルーチン行為終了時の行為終了時刻における行為選択確率と行為継続時間に関する確率分布を用いて、ルーチン行為終了後に実施する行為を決定する。次に、当該行為の継続時間を継続時間数頻度分布によって決定する。まだ空白の時間が存在する場合、すべての空白ステップが非ルーチン行為により埋められるまでこの過程を繰り返す。

以上のモデルにより計算対象世帯における居住者の生活行動と連動したエネルギー需要の推計が可能となった。

## (2) 業務施設

業務施設では、業務施設の建築仕様（用途と規模）、建築設備仕様、使われ方に基づいて

業務施設のストックを類型化した。

近畿圏における事務所、商業施設、飲食施設、宿泊施設、医療施設（病院）、文教施設の 6 種の建物用途を対象とした。本モデルでは気象条件のほか、用途と規模の組み合わせによって「業態」を定義し、業態別の建築仕様、建築設備仕様、施設の使われ方、エネルギー消費に関する情報を収集・整理し、それぞれを考慮した類型区分を開発した。また、法人建物調査、商業統計、GIS データ等を用いて業務施設ストックの類型別延床面積を算出した。次に、各類型区分について平均的な建築仕様、建築設備仕様、フロアの使われ方を決定し、ストックを代表する代表建物モデルを設定した代表建物モデルの設定値を入力条件としてエネルギー需要シミュレーションを行い、推計されたエネルギー需要を床面積当たりのエネルギー需要に原単位化する。次に、類型区分別床面積との積和をとる（積み上げる）ことで対象地域のエネルギー需要を定量化する。シミュレーションのタイムステップは 1 時間である。

## (3) 旅客交通部門

旅客交通部門のモデルでは、平成 12 年度京阪神都市圏パーソントリップ調査の結果を用いた。モデルの推計単位はトリップであり、出発地と到着地の組み合わせ、交通手段別に類型を作成し、それぞれの類型についてトリップ当たりのエネルギー需要を算出した。トリップ当たりのエネルギー需要推計においては、出発地・到着地の距離、交通手段別のエネルギー需要原単位を乗じることで推計した。

## (4) 開発モデルによる一人当たりのエネルギー消費の推計

モデルによる部門別エネルギー需要推計結果を用いて、近畿圏の人口一人当たりのエネルギー消費量を推計した。ここでは属性として勤め人男・女、ひとり暮らしの勤め人男・女、家庭婦人、70 歳以上男・女、小学生、中学生、高校生の 10 属性を区別し、それぞれの消費量を定量化した。

図 2 に推計結果を示す。勤め人男女と一人暮らしの男女を比較すると、ひとり暮らし男女は家庭部門のエネルギー消費が特に大きい。これは冷蔵庫など世帯に 1 台設置されている機器のエネルギー消費量が存在するためである。また、勤め人に共通して業務部門及び旅客交通部門におけるエネルギー消費量が大きい。このほか、住宅での滞在時間が長い家庭婦人、70 歳以上の男女の家庭部門エネルギー消費量が大きい。一方、これらの属性は業務部門、旅客交通部門のエネルギー消費が小さい。また、家庭婦人と 70 歳以上男女を比べると、家庭婦人のほうが買い物などによる外出機会が多いため、旅客交通部門、業務部門のエネルギー消費量が大きくなった。小中高生は在宅時間が短く、かつ徒

歩・自転車によるトリップが多いことから、他の属性と比較してすべての部門のエネルギー消費が小さい。

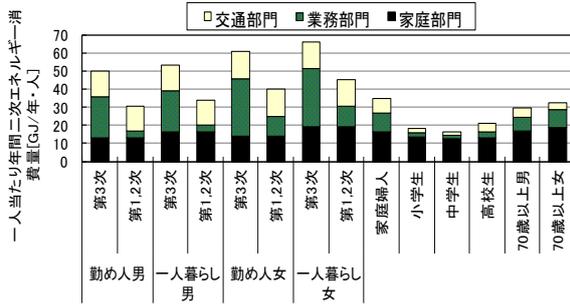


図2 一人当たりのエネルギー消費量推計結果

(5) 地域別のエネルギー消費量推計

前節までに説明した方法では市区町村別のエネルギー消費の定量化が可能である。ここでは、地域別にひとり当たりのエネルギー消費を算出し、地域性との関係进行分析した結果を示す。

地域性を表す因子として考慮したのは単身世帯比率、高齢世帯比率、世帯当たり床面積、集合住宅比率、自動車依存度・自由トリップ数である。ただし、旅客交通部門のエネルギー需要モデルでは、京阪神都市圏パーソントリップ調査で用いられている中ゾーン（京阪神都市圏を63の地域に分類している）を対象としてエネルギー消費量を推計していることから、他の部門についても、中ゾーンに各因子のデータを集計し、分析に用いることにした。考慮した6因子の間に強い相関がみられたことから、主成分分析を行い、因子が持つ情報を集約した。この結果抽出された主成分を入力条件としてクラスター分析（ウォード法を使用）を行い、近畿圏を8つの地域類型に分類した。次に、地域類型別に一人当たりのエネルギー消費量を部門別に算出し、地域類型との関係を考察した。

主成分分析の結果得られた主成分1は単身世帯比率、集合住宅比率と正の強い相関を持ち、世帯当たり床面積、自動車依存度と負の強い相関を持つ。従って、都市部、郊外、中山間村という都市軸であると考えられる。類型化の結果を図3に、地域の類型化に用いた各因子の地域類型別平均値を表1に示す。

図4に各地域類型における一人当たりのエネルギー消費量を示す。図では部門別、エネルギー使用用途別に結果を示しており、家電から冷暖房までが家庭部門、照明・機器からその他までが業務、残りの二つの区分が旅客交通部門のエネルギー消費量を示す。地域類型別にみるとひとり当たりのエネルギー消費量が最小となった類型3と最大の類型6の差異は5.4[GJ/年・人]であった。

図5に主成分1と3部門のひとり当たりエネルギー消費量合計値の関係を地域別に示す。主成分1が最も高くなった地域は大阪市、京都市が含まれる類型1であり、前述のよう

に主成分1は都市型の都市形態であるほど高く、郊外、農村で低くなる傾向があるといえる。しかし、図からわかるように主成分1とひとり当たりのエネルギー消費の間に明確な関係が読み取れるとは言い難い。ひとり当たりエネルギー消費の最大値は37.3[GJ/年・人]、最小値は28.0[GJ/年・人]であるが、この二つの地域間で主成分1の差異は小さい。

表1 各類型の特徴

類型	単身世帯比率	高齢世帯比率	集合住宅比率	世帯当たり床面積	自動車依存度	年間出勤・自由目的トリップ
	%	%	%	m <sup>2</sup>	%	トリップ/年・人
1	25.0	17.7	52.0	82	26.6	393
2	21.0	15.1	44.7	81	31.1	360
3	15.2	13.2	40.6	85	38.9	338
4	14.3	15.1	30.3	97	44.2	357
5	9.9	13.6	20.9	107	57.6	296
6	15.2	12.0	26.4	104	58.1	368
7	13.4	18.7	19.1	111	59.3	372
8	8.2	18.2	12.4	106	59.5	327

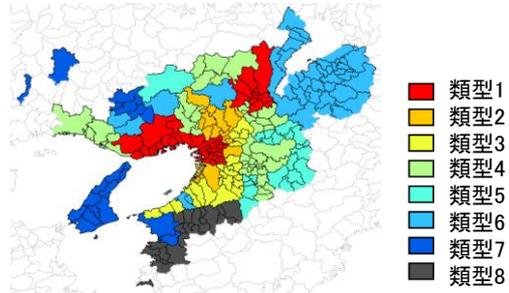


図3 近畿圏類型化結果

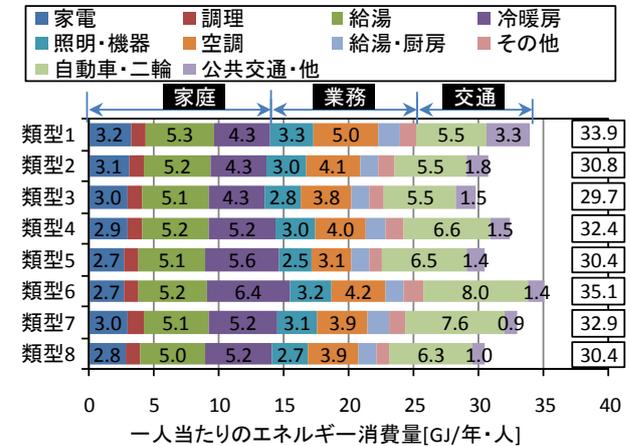


図4 地域類型別の一人当たりのエネルギー消費量

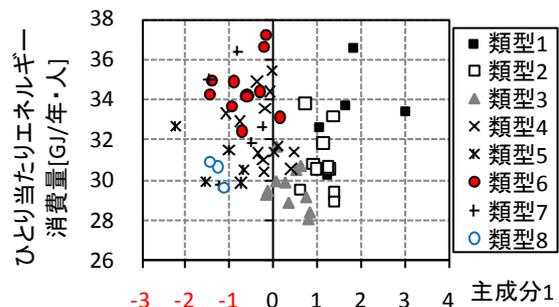


図5 主成分1と一人当たりのエネルギー消費量の関係

コンパクトシティに関する議論では、都市形態および人口の配置を転換し、エネルギー消費量の小さい都市を形成することが提案されている。この主張の根拠は地域によって交通部門のエネルギー消費が大きく異なることであり、本研究でも、最小の地域は5.9[GJ/年・人]に対して最大の地域は12.2[GJ/年・人]と大きな差異が示された。しかし、3部門のエネルギー消費をあわせると、地区類型別のひとり当たりのエネルギー消費量の差異は5[GJ/年・人]程度、個々の地域では10[GJ/年・人]であり、人口・ストックの配置の変更は必ずしもエネルギー消費の大幅な削減に結びつくわけではないといえる。この理由は、各都市においてエネルギー消費の増加要因、減少要因が同時に存在しているためである。増加要因、減少要因の一例は家庭部門の結果の説明に述べた。交通部門でも、自動車依存度の低い一方一人当たりのトリップ数が大きい地域がみられる。また、3部門のエネルギー消費の間の相関係数が低かったことも(家庭と業務0.11, 家庭と交通0.31, 業務と交通0.11), 増加要因, 減少要因の相殺を説明するものである。したがって、エネルギー消費の削減を導くためには、集合住宅比率や住宅規模のようなフィジカルな特徴だけでなく、世帯構成や行動特性、気候条件など地域に付随する特性を考慮した検討が必要であると考えられる。

#### (6) 計算ケースに基づくエネルギー需要推計

最後に、民生家庭部門・業務部門を対象としてエネルギー需要の将来推計を行った結果を示す。計算対象年は2010年、2030年とした。2030年については、ある程度成り行きで生じると考えられる変化を想定したBAUケースと、利用可能な技術の普及を想定した省エネ強化ケースを用意した。開発モデルは時刻別のエネルギー需要の推計が可能であることも特徴であり、その結果も併せて示す。

図6に家庭部門のエネルギー需要推計結果(二次)を示す。人口問題研究所による推計では世帯数は2010年度の860万世帯から2030年度の793万世帯に減少する。この影響を含め、電力需要は2030年度に2010年度比12%減少、省エネ強化ケースで23%減少すると推計された。灯油・ガスは2030年度9%減少、省エネ強化ケースでは潜熱回収型給湯器の普及により21%減少すると推計された。

業務部門の推計結果を図7に示す。今回は用途別・規模別床面積の分布を一定と想定し、業務施設の床面積増加などのエネルギー消費を増加させる変化を考慮していないことから、エネルギー需要は2010年度から2030年度にかけて減少すると推定された。図は用途別に電力およびガスの需要を示す。電力需要は2010年度から2030年度までに11%減少し、ガスは16%減少した。この減少に対する最も大きな要因は空調用熱源システムの効率向上である。2030年度省エネ強化ケースで

は断熱性強化、照明の高効率化、その他空調関連の省エネルギー技術の普及、トップラナー効率を持つ熱源機器の普及を想定した。これにより2010年度比で電力22%、ガス29%が減少した。

仮に2030年における電力システムのCO<sub>2</sub>排出係数が2010年と同じ(0.311kg-CO<sub>2</sub>/kWh)とすると、CO<sub>2</sub>排出量は図8のように推計された。棒グラフ上の数字は2010年を基準に算出した削減率である。省エネ強化ケースでは20%弱のCO<sub>2</sub>排出量が削減される。また、PVが8.9GW(人口比で全国53GWに相当)設置されたとすると、削減率は8%増加する(図中省エネ強化+PV8.9GW、負値として削減量を表示)。この結果から、民生家庭部門、業務部門における省エネルギーの推進は温暖化対策として重要であることがわかる。

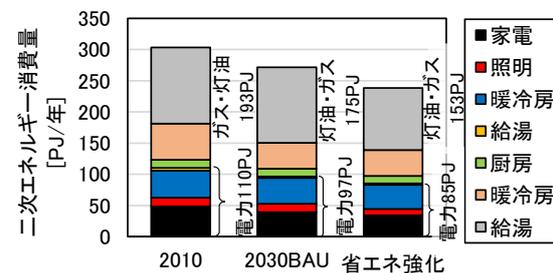


図6 家庭部門の二次エネルギー消費量推計結果

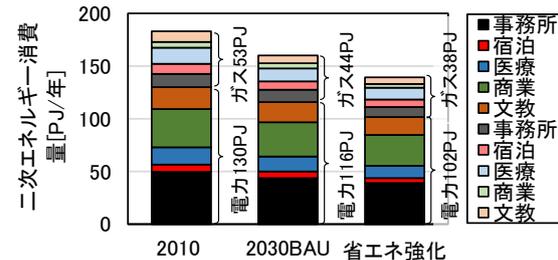


図7 業務部門の二次エネルギー消費量推計結果

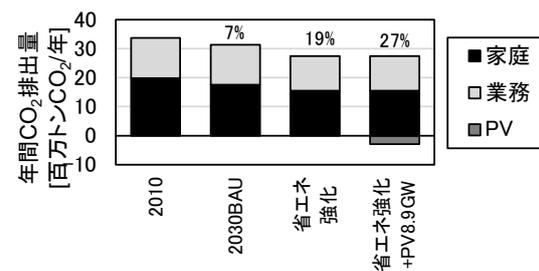


図8 CO<sub>2</sub>排出量合計値の推計結果

各計算ケースにおける電力需要の時刻別変化を表すため、各計算ケースにおいて推計された電力需要の平日時刻別平均値を月別に算出し、図9に示した。2010年度と2030年度BAUでは8月平日昼間に約2GWの差異があり、成り行きで生じると考えられる変化によって電力需要が大きく減少する可能性があることがわかった。ただし、今回の推計では業務施設の増加などエネルギー需要を増加させる変化についての想定が十分ではない点に注意が必要である。省エネ強化ケースではさらに2GW程度、8月昼間の電力需要が減少する結果となった。

図では PV が 8.9GW 設置された場合を想定して推計された発電量も示している。4GW～6GW 昼間のピーク時間帯において発電が生じると推計された。

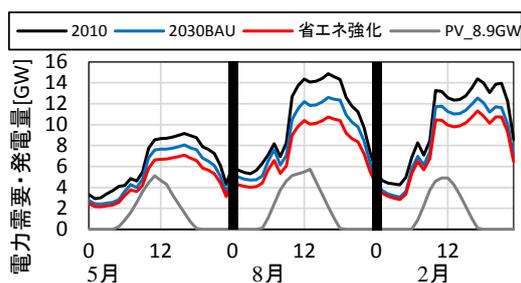


図9 時刻別電力需要・発電量月別平均値(平日)

#### (7) まとめ

本研究では民生家庭部門，業務部門，旅客交通部門を対象として，エネルギー需要を推計するモデルを開発した。研究成果を以下にまとめる。

- 開発されたモデルでは，個々の住宅，業務施設，旅客交通の単位ではエネルギー需要が決定される構造そのものが適切に再現され，かつ，社会の問題の単位である都市圏等のスケールでエネルギー需要を推計することができる。
- 3部門を対象としてエネルギー需要が推計されることから，コンパクトシティなどの部門間の連携が必要となる課題についての検討が可能である。
- 人の行動に基づいてエネルギー需要を推計していることから，時刻別のエネルギー需要の推計が可能である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① Yohei Yamaguchi, Soki Nakashima, Yoshiyuki Shimoda. Per capita energy consumption for living, work, transport and other activities in cities in the Keihanshin Metropolitan Region, Japan. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, Vol. 3, No. 1, pp. 68-76, 2012.3.  
DOI:10.1080/2093761X.2012.673923
- ② 高村しおり, 山口容平, 羽原宏美, 下田吉之. 太陽光発電と省エネルギー技術の大規模導入を考慮した地域電力需要の将来推計. *日本建築学会環境系論文集*, vol. 77, pp. 805-811, 2012年10月.  
<http://doi.org/10.3130/aije.77.805>
- ③ 山口容平, 鈴木雄介, 山崎政人, 下田吉之, 村上周三, 坊垣和明, 松縄堅, 亀谷茂樹, 高口洋人, 半澤久, 吉野博, 浅野良晴, 奥宮正哉, 村川三郎, 依田浩敏. 非住宅建築物の環境関連データベースに基づく小売業態分類別商業施設一次

エネルギー消費原単位の比較, *日本建築学会環境系論文集*, vol. 77, pp. 889-897, 2012年11月

<http://doi.org/10.3130/aije.77.889>

- ④ Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda, Takehito Kitano. Reduction potential of operational carbon dioxide emission of Nakanoshima business/cultural area as a model for low-carbon districts in warm climates. *Building and Environment*, vol. 59, pp. 187-202. 2013.1.  
doi:10.1016/j.buildenv.2012.08.019
- ⑤ 山口容平, 永山紗弥子, 下田吉之, 西山満, 西端康介, 今井和哉, 濱根潤也, 三瀬農士. 小規模事務所における冬期暖房負荷と室内温度分布, *空気調和・衛生工学会論文集*, No.197, pp.1-9, 2013年8月

〔学会発表〕(計 27 件)

- ① Yohei Yamaguchi, Takuya Fujimoto, Yoshiyuki Shimoda. Occupant Behavior Model for Households to Estimate High-temporal Resolution Residential Electricity Demand Profile. *Proceedings of the BS2011, Sydney, Australia*, pp.1548-1555, Nov.14-16, 2011.11.
- ② Akiko Matsuoka, Yohei Yamaguchi, Yusuke Suzuki, Yoshiyuki Shimoda. Urban scale modelling of energy demand of retail facilities, *Proceedings of BS2013, Chambery, France*, pp. 1288-1295, Aug. 25-28, 2013.8.
- ③ Yohei Yamaguchi, Yusuke Suzuki, Ruchi Choudhary, Adam Booth, Yoshiyuki Shimoda. Urban-scale energy modeling of food supermarket considering uncertainty. *Proceedings of the BS2013, Chambery, France*, pp. 1288-1295, Aug. 25-28, 2013.8.
- ④ Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda. Validation of an Energy Demand Model of Residential Buildings. *Proceedings of the ASim2014, Nagoya, Japan*, pp. 625-632, 2014.11.  
ほか23件

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

山口容平 (YAMAGUCHI, Yohei)

大阪大学大学院工学研究科

研究者番号: 40448098