

jh200060-NAH

国民生活シミュレーションに基づく住宅・業務施設のエネルギー需要予測

山口 容平 (大阪大学)

概要 本研究は日本の民生家庭部門・業務部門の脱炭素化の検討に活用可能なエネルギー需要モデルの開発を目的とした。開発モデルは GIS や国勢調査などの利用可能な統計情報から対象地域に立地・居住する業務施設・世帯を生成し、生成した業務施設・世帯に対して建築仕様、設備仕様等に関する多数のエネルギー需要決定因子を組み合わせて付与する Synthetic アプローチを採用した。各業務施設、住宅のエネルギー需要推計では、施設利用者、住宅世帯構成員の生活行動を確率モデルにより生成し生活行動に基づいてエネルギー需要を定量化する。このような仕様により将来における技術普及がもたらすエネルギー需要および二酸化炭素排出量の変化を推計可能である。開発モデルにより、①日本全国の業務部門、②東京都世田谷区、三鷹市、調布市、狛江市の民生家庭部門、業務施設ストックの二酸化炭素排出量削減可能性の評価を実施し、開発モデルが有用であることを確認した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

大阪大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

山口容平、Li Yuanmeng、的場晴香、黒川祐輔、秋沢琴音、Bin Perwez Usama、正田悠人、孫超、今井達也、鳴川公彬、山下皓太郎 (大阪大学：エネルギー需要推計)

村田健史 (情報通信研究機構：エネルギー関連データの可視化)

に対応する選択肢の明確化は重要な課題である。

本研究は日本の脱炭素化の道筋を明確にするため、日本全国の家庭部門 (住宅) 及び業務部門 (非住宅建築物) を対象として、エネルギー需要および二酸化炭素 (CO₂) 排出量の推計を行うモデルの開発を目的とした。特に、民生業務部門では比較的近い将来や比較的小さい CO₂ 排出量の削減を想定した評価が多く、IPCC で検討されている長期で大幅な削減を検討したものは少ない。部門全体を対象とする評価では比較的簡易な方法が用いられており、推計誤差が大きく、分析機能が限定的であった。また、民生家庭・業務の両方を対象として、高い時空間解像度でエネルギー需要を推計するモデルは開発されていなかった。このような背景から、本研究では日本の業務部門を対象とするエネルギー需要モデルと、地域スケールで高い時空間解像度で民生家庭・業務の両方のエネルギー需要を推計できるモデルの開発を行った。

2. 研究の目的と意義

IPCC が 2018 年に発表した 1.5°C 特別報告書 (IPCC, 2018) では、地球大気の大気温度上昇を産業革命以前の水準から 1.5°C 未満で安定させるためには、早急に大幅な二酸化炭素 (CO₂) 排出量削減を実現することが必要と述べられている。今後の日本の温暖化対策を設計するにあたり、CO₂ 排出量削減をもたらさる具体的な対策群の特定、削減可能な CO₂ 排出量の定量化、今後社会的に意思決定されるであろう CO₂ 排出量の削減水準・時期

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究で開発したモデルの概要を図 1 に示す。開発モデルでは業務部門については個々の業務施設、家庭部門について世帯を単位としてエネルギー需要を推計する。業務施設、世帯単位のエネルギー

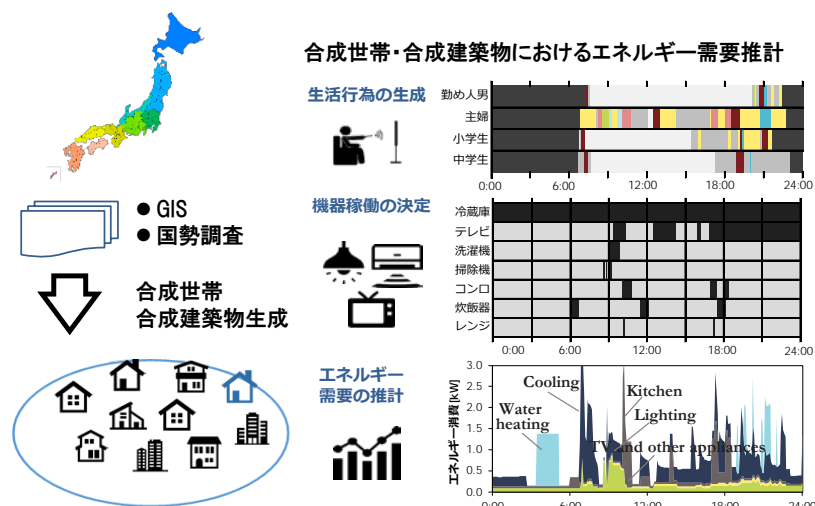


図 1 エネルギー需要推計モデルの概要

エネルギー需要シミュレーションでは、施設利用者および世帯構成員の生活行動を確率生成し、生活行動と紐づけて各種エネルギー消費機器・設備のエネルギー消費を決定し、その積み上げとして業務施設、世帯のエネルギー需要を定量化する。日本全国などのある程度広域の地域を対象とする場合、対象とする業務施設ストック、世帯を代表する業務施設、世帯（代表モデルと呼ぶ）を生成し、エネルギー需要シミュレーションを行い、結果を業務施設床面積、世帯当たりで原単位化する。最後に、各代表施設、世帯が代表する業務施設床面積、世帯数と原単位の積を取り、対象とするストック全体のエネルギー需要を推計する。具体的な地域を対象としてエネルギー需要推計を行う場合、GIS データ、国勢調査等に基づいて地域に立地する業務施設、世帯を生成し、生成した全業務施設、世帯を対象としてエネルギー需要推計を行う。

なお、代表モデルの設計や地域単位の業務施設・世帯の生成においては、建築仕様、機器・設備仕様、機器・設備運用等に関するテンプレートを多数用意しておき、その合成として一つの代表モデルを構築する Synthetic アプローチを採用している。これにより多種多様な業務施設、世帯に対応してエネルギー需要の推計が可能となった。具体的には、業務施設については、立地、建築規模・業態、設備種別について、世帯については居住地域、世帯構成、住宅仕様、設備・機器の所有状況、仕様、使用傾向などについて多様性を考慮する仕様とし、

将来における技術採用状況の変化がもたらす効果を定量化できる仕様とした。また、エネルギー需要推計では、個々の施設利用者、世帯構成員の生活行動を確率生成するモジュールを組み込み、エネルギー需要の時刻的特性を表現可能な仕様とした。このように設備や省エネルギー手法の多様性、施設利用者の滞在状況・世帯構成員の生活行動を考慮したエネルギー需要モデルは世界でも開発されていないものである。

このような仕様から、多数の計算対象についてシミュレーションを実施する必要があること、一つの計算対象においても計算負荷がある程度大きいこと、加えて、温暖化対策に進展を考慮した推計を行うためには社会状況を考慮した複数のシナリオの下で計算を実施する必要があることから、研究室で所有しているサーバのみでは十分な計算を遂行することができなかった。本事業において大阪大学サイバーメディアセンターの計算資源を活用することにより、今後の CO₂ 排出量削減可能性に関する計算を遂行することが可能となった。

4. 今年度の研究成果の詳細

4. 1 業務施設を対象とする CO₂ 排出量削減可能性評価

4. 1. 1 エネルギー需要の計算条件の概要

本研究は日本の事務所、宿泊、医療、商業小売、学校施設ストックを対象として、表 1 に示す技術普及ケースを想定し、エネルギー需要、CO₂ 排出

量の推計を行った。2013 年ケースは地球温暖化対策の基準年である 2013 年度を想定した。2030 年ケースでは近年観測されている技術選択が継続するとともに、地球温暖化対策計画¹⁾に記載されている対策技術が普及することを想定した。2050 年ケースでは、さらに省エネルギー技術が普及し、冷暖房、給湯において電化が進展することを想定した。CO₂ 排出量の推計では、電力の CO₂ 排出係数を 2013 年ケースで 2013 年度の 0.551 kg-CO₂/kWh²⁾、2030 年ケース、2050 年ケースでは 0.370 kg-CO₂/kWh³⁾、都市ガスは全ケースで 2.23kg-CO₂/Nm³⁴⁾用いた。

4. 1. 2 エネルギー需要の推計モデル

開発したモデルの概要を図 2 に示す。手順 1 では用途や規模といったエネルギー需要に大きな影響を及ぼす因子によって対象ストックを類型化し、手順 2 で各ストック類型を代表する代表モデルを作成する。代表モデルは類型の標準的な特徴を持つ建物であり、手順 3 のシミュレーションで入力条件として使用される。その結果を延床面積により原単位化し、手順 4 でストック類型の延床面積との積和によりストック全体のエネルギー需要を定量化する。これにより地域や建物用途、規模など様々な因子の違いによる対策効果の差異、ストックの構成の変化を反映して、省エネルギー技術の普及による効果をストック全体で定量化することができる。モデルの開発手順は Kim^ら⁵⁾に詳しい。

(1) ストックの類型化

立地による類型は日本全国を北海道、東北、関東、中部、北陸、近畿、中国、四国、九州、沖縄の 10 地域に分類し、それぞれの気象条件の差異を考慮できるようにした。事務所、宿泊施設、医療施設については

表 2 に示す規模区分を考慮した。商業施設は表 3 に示す 14 の業態を考慮した。空気調和設備については代表的なシステム区分として設備の一次側（熱源）7 区分、二次側（空気調和機）7 区分、給湯システムについては 8 区分を考慮した。加えて、空調省エネルギー手法として、全熱交換器、外気

冷房、外気導入量 CO₂ 制御、水搬送系統における変流量方式を考慮し、ストック類型としてすべての組み合わせを考慮した。

表 1 計算ケース

ケース	ケースの想定
2013 年	2013 年の社会を想定した。
2030 年	HP 給湯機の普及を除いて、地球温暖化対策計画に基づいて技術普及が起こることを想定。建築設備ストックについては 2010 年代に観測された技術採用傾向が 2030 年まで継続することを想定した。
2050 年	冷暖房、給湯熱源の電化を想定した。また、利用可能な省エネルギー技術の全てが全ストックに採用されることを想定した。

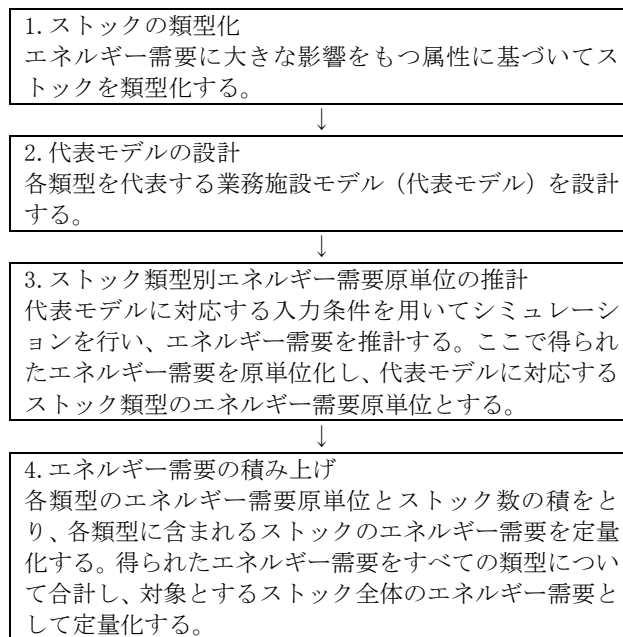


図 2 エネルギー需要推計モデル開発手順

表 2 建物規模による事務所、宿泊施設、医療施設の類型

規模区分	延床面積	規模区分	延床面積
CL1	200 m ² 未満	CL6	5,000-10,000 m ²
CL2	200-500 m ²	CL7	10,000-20,000 m ²
CL3	500-1,000 m ²	CL8	20,000-50,000 m ²
CL4	1,000-2,000 m ²	CL9	50,000 m ² 以上
CL5	2,000-5,000 m ²		

表 3 商業施設の業態分類

番号	類型	番号	類型
R1	コンビニエンスストア	R8	標準食料品スーパー
R2	専門店	R9	大型食料品スーパー
R3	ホームセンター	R10	小型総合店舗
R4	衣料品・住関連スーパー	R11	標準総合店舗
R5	コンビニエンスドラッグ	R12	大型総合店舗
R6	スーパードラッグ	R13	標準百貨店
R7	小型食料品スーパー	R14	大型百貨店

表 4 代表モデルの仕様(CL1～CL9 は規模区分を示す)

用途	項目	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7	CL8	CL9
事務所	延床面積 [m ²]	132	349	726	1,447	3,258	7,089	13,873	31,238	190,202
	基準階床面積 [m ²]	66	116	182	289	543	1,013	1,734	2,840	6,559
	階数	2	3	4	5	6	7	8	11	29
	フロア用途	事務所						事務所, 会議室, 飲食店, 小売店		
宿泊	延床面積 [m ²]	137	364	744	1,444	3,200	7,611	15,083	34,528	177,850
	基準階床面積 [m ²]	69	121	186	289	457	846	1,160	2,877	6,587
	階数	2	3	4	5	7	9	13	12	27
	フロア用途	ロビー, 客室			同左+飲食				同左+宴会場	
医療 福祉	延床面積 [m ²]	136	330	701	1,455	3,238	7,597	14,696	31,309	104,835
	基準階床面積 [m ²]	68	110	234	364	648	1,266	2,449	4,473	6,989
	階数	2	3	3	4	5	6	6	7	15
	フロア用途	診療室, 待合室, 処置室			診療室, 待合室, 処置室, 病室		診療室, 待合室, 処置室, 病室, 飲食		診療室, 待合室, 処置室, 病室, ICU, 飲食	

(2) 代表モデルの設計

建築仕様、フロアの使われ方に関する代表モデルの想定を表 4 に示す。代表モデルは各類型における平均的な仕様を持つ業務施設である。事務所、宿泊施設、医療施設は施設規模の増加に伴って用途が複合化する傾向があることから、代表モデルではフロアを単位として表に示すフロア用途を想定し、照明、コンセント機器の消費電力、建物内入室者の在室密度、外気導入量を想定した。これらの設備仕様を含めた代表モデルの仕様の決定方法は Kim ら⁵⁾に詳しい。ただし、すべての組み合わせについてエネルギー需要を推計することは困難であることから、50,000 m²未満の床面積となったストック類型を他と統合した。この結果、2013 年ケースでは合計約 5 千の代表モデルが構築された。

(3) 代表モデルを用いたエネルギー需要推計

代表モデルを用いたエネルギー需要の推計にはアメリカ Department of Energy が開発している EnergyPlus 8.6⁶⁾を用いた。代表モデルを用いたエネルギー需要推計では、業務施設の需要を施設利用者の滞在に起因する需要と、滞中に独立な需要に分類し、両方を考慮した。施設利用者の滞中に起因するエネルギー需要の推計には施設利用者の滞在スケジュールを用いる。滞在スケジュールは施設利用者をエージェントとして到着時刻、滞在時間数、外出の生起、外出時間数を乱数生成して決定し、確率的に決定した。乱数生成では、到着時刻と滞在時間数の累積頻度分布、外出確率、外出

時間数の累積頻度分布を用いるが、これらの分布は都市圏単位で人の移動を調査したデータベースである第 5 回近畿圏パーソントリップ調査を用いて作成した⁷⁾。次に、照明・コンセント機器・空調・熱源のスケジュールを表 5 に示す条件で決定する。これにより、施設利用者の滞在時間のばらつきを考慮して、ある程度現実的な電力需要の変化パターンを設定することができる。

施設利用者の滞中に独立したエネルギー需要には待機電力や非常用・保安用などの電力需要がある。本研究ではこれらの合計を「その他電力」と呼び、24 時間一定として業務施設用途別に与えた。この数値は、環境共創イニシアチブ (SII) が BEMS 補助事業の実績報告データ⁸⁾として公開している電力需要データ (SII データと呼ぶ) に基づいて決定した。SII データは BEMS で計測された時系列の電力需要を格納したデータであり、延床面積などの施設属性も利用可能である。

表 5 機器稼働条件

用途	稼働条件
照明	事務所・医療施設：ゾーン内に 1 人でも人がいたら稼働
	宿泊施設：決定した照明容量を最大値とし、在室率に比例して稼働
機器	機器容量を最大値とし、在室率に比例して稼働
空調機	事務所：ゾーン内の在室率が 10% を越えたら稼働
	宿泊施設・医療施設：ゾーン内に 1 人でも人がいたら稼働
熱源	空調機が 1 台でも稼働していたら稼働

時刻別電力需要の推計結果の一例として、中規

模のオフィスビルにおける 2 月、5 月、8 月における電力需要の実態値と推計値を比較した結果を図 2 に示す。面グラフで推計値の平日平均値を示し、線グラフで対応する実態値を示す。エラーバーは SII の平均値 ± 2 ×標準誤差の区間を示しているが、冬期 8 時ごろの挙動に誤差があるものの、そのほかはおおむね実態に近い挙動を示した。

(4) エネルギー需要の積み上げ

各種統計データ、GIS データ等に基づいて規模・業態、立地地域別の内訳を定量化した。加えて、新築業務施設において採用されている設備を収録した竣工設備データに基づいて設備採用状況を模擬するロジスティック回帰モデルを開発し、当該モデルを日本全国の対象ストックに適用して、設備区分別延床面積を定量化した。詳細は秋沢ら⁹⁾に詳しい。

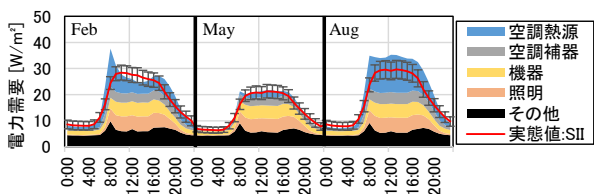


図 2 中規模事務所ビルの電力需要推計結果

4. 1. 3 エネルギー需要推計

(1) 2013 年度の推計結果

2013 年ケースにおける一次エネルギー消費量推計結果を図 3 に示す。図では燃料種別、施設用途別、最終需要別にデータを表示している。一次エネルギー消費量は約 2600 PJ/年と推計された。CO₂ 排出量は 148 MtCO₂/年と推計された。一次エネルギーでは電力が占める割合が大きく、施設用途では事務所、商業小売の比率が高い。最終需要では照明、空調熱源の比率が高く、空調熱源と補器を合わせると空調用途の比率が最も高い。

日本全国の対象ストックにおける電力需要を推計した結果を図 4 に示す。8 月における平均電力需要は約 55 GW と推計された。5 月は最大 35 GW 程度であり、その差異は主に冷房用、冷凍冷蔵用の電力需要の増加が占め、20 GW 程度である。冬期では朝方の立ち上がりが大きく、時刻における挙動が冬期と夏期では異なる。

(2) 2030 年、2050 年ケースの推計結果

2013 年、2030 年、2050 年ケースの一次エネルギー消費量の推計結果を図 5 に示す。2030 年ケース、2050 年ケースにおける一次エネルギー消費量はそれぞれ 26%、40%減少した。CO₂ 排出量では、電力の CO₂ 排出係数の改善効果も含めて、2030 年ケースで 49%、2050 年ケースで 60%減少すると推計された。

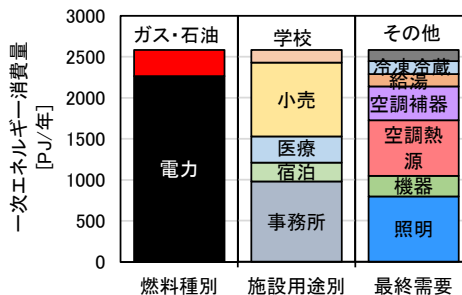


図 3 一次エネルギー消費量の推計結果

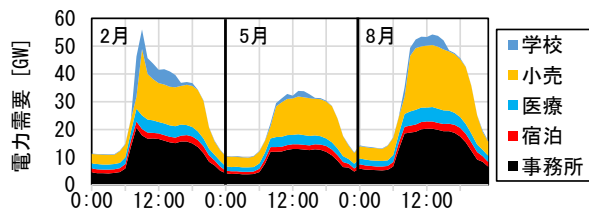


図 4 2013 年ケース代表月平均電力需要推計結果

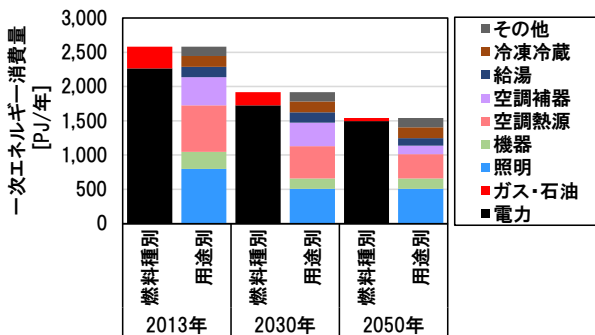


図 5 3 ケースの一次エネルギー消費量推計結果

(3) 電力需要の推計結果

図 6 に 2 月、5 月、8 月の時刻別電力需要平均値を示す。図からわかるように、2013 年ケースから 2030 年ケースにかけて電力需要が大きく減少した。この効果は照明・コンセント機器の効率向上、空調関連省エネルギー手法の普及、空調熱源機器の効率向上によるものである。2030 年から 2050 年の間に照明、コンセント機器の変化を想定

していないことから、2030 年ケースから 2050 年ケースの差異は空調・給湯用途の変化によるものである。空気・給湯設備の熱源は全て電化されているが、両ケースは同程度の電力需要となった。これらの結果は電力システムの計画に有用なものである。

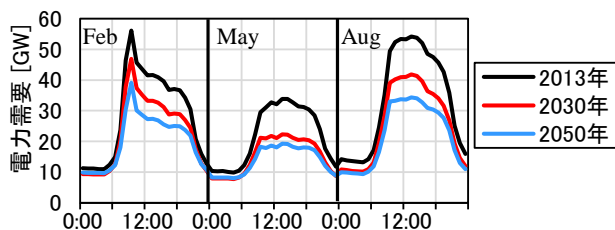


図 6 3 ケースの代表月平均電力需要推計結果

4. 2 地域単位のエネルギー需要推計

4. 2. 1 検討概要

地域スケールでエネルギー需給をとらえた場合、エネルギー需要はそこに集積する個々の住宅、業務施設の建築仕様、設備・機器所有状況、それらの運用により形成される。また、太陽光発電 (PV) の設置可能量も地域によって異なることから、エネルギー需要、電力需給、エネルギーシステムの性能は地域的に差異があると考えられる。一方、地域のエネルギー需要、需給に関する研究では住宅のみ、業務施設のみを対象としたものが多く、将来における変化を包括的に考慮してエネルギー需給の変化を推計した研究はみられない。

そこで、本研究では世帯集積状況や業務施設分布等の地域特性を考慮して住宅・業務施設のエネルギー需要の将来推計を実施し、省エネルギー技術・PV 導入状況の変化により生じるエネルギー需給の将来変化、それに起因するエネルギーシステム性能の変化を明らかにすることを目的とした。以下では、ケーススタディとして開発モデルを東京都世田谷区、三鷹市、調布市、狛江市に適用した結果を示す。対象地域の世帯数は約 64 万世帯、業務施設の総延床面積は約 800 万 m² である。

4. 2. 2 エネルギー需要推計結果

対象 4 区市全体の民生部門の用途別・燃料種別年間一次エネルギー消費量を図 7 に示す。年間二酸化炭素排出量は 2016 年シナリオに対し、2030 年

シナリオでは 40%、2050 年シナリオでは 72%削減されるという結果が得られ、対象地域全体の一次エネルギー自給率、自家消費率は 2050 年シナリオでそれぞれ 26%、82%となった。

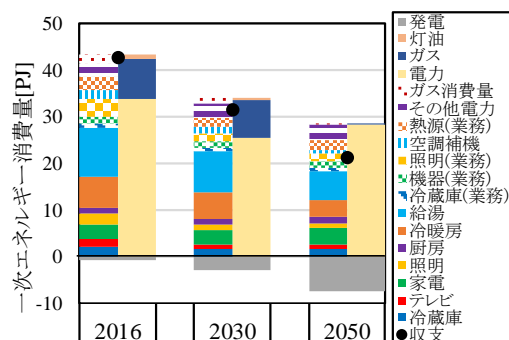


図 7 年間一次エネルギー消費量の推計結果

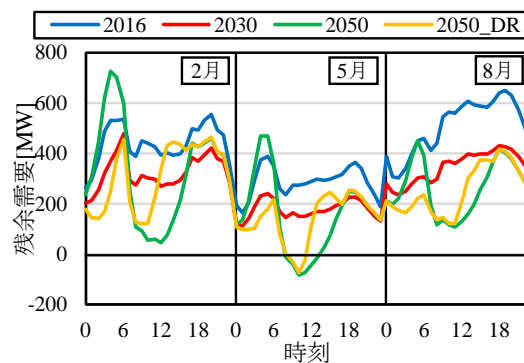


図 8 代表月平日の時刻別系統電力負荷の推計結果

代表月における 4 区市全体の時刻別系統電力負荷を図 8 に示す。2016 年シナリオから 2030 年シナリオにかけて系統電力負荷ピーク値と変動幅は減少するが、2050 年シナリオでいずれも増加する。ピーク・変動幅は冬季に最大、夏季に最小となった。2050 年シナリオのピーク需要は 4 時前後における HP 給湯機の消費電力に起因する。一方、昼間の系統電力負荷は小さく、5 月では PV 発電量が電力需要を上回る時間帯も見られる。2 月や 8 月では冷暖房、熱源による消費電力が大きく、電力負荷総量は負にならなかった。これらの結果は、PV 導入及び電化の進展は一次エネルギー消費量削減に貢献するが、HP 給湯機稼働の集中により、系統電力負荷のピーク及び変動を増大させる可能性があることを示唆している。この系統電力負荷ピーク・変動緩和と PV 電力有効活用を目的として HP 給湯機を昼間稼働させた場合 (2050_DR)、

2 月の平日平均でピークは 36%減少し、変動幅は 50%減少した。

なお、推計では個々の住宅、業務施設を対象として推計を行っていることから、地域特性を考慮した分析が可能である。推計したエネルギー需要データを使用して電力配電網の性能評価を実施した。検討例として、小地域（住所の町丁目）別に 2050 年ケースにおける PV によるエネルギー自給率を推計した結果を図 9 に示す。図からわかるように、地域によって自給率に差異があり、脱炭素化においては地域特性を考慮した検討が有効である。

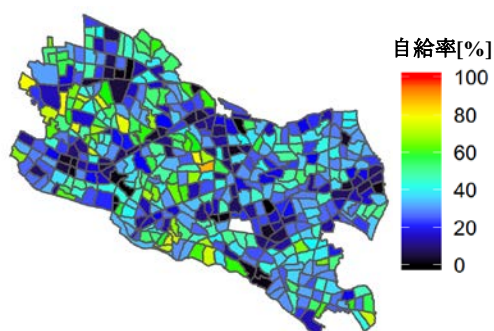


図 9 電力需要 PV 自給率

5. 今年度の進捗状況と今後の展望

4. 1 節に示した日本の業務施設を対象とするエネルギー需要推計、4. 2 節に示した地域単位のエネルギー需要推計はいずれも計算負荷が高く、かつ、日本の脱炭素化に向けて有用な知見を含むものであった。一方で、システム開発に対して予定していた以上の時間が必要となり、予定していた一部の計算ができなかった。

現在、4. 1 節、4. 2 節に説明した内容を国際ジャーナルに投稿している。今後は、再生可能エネルギー導入の検討、モバイル人流データを用いたモデルの精度向上などを行い、日本の脱炭素化に貢献できるように検討を進める予定である。加えて、推計した電力需要データを配電網計画、電力需給運用等に利用できるよう電気工学分野の研究者と連携を進める予定である。

6. 研究業績一覧

(1) 学術論文（査読あり）

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

(3) 国際会議発表（査読なし）

(4) 国内会議発表（査読なし）

正田悠人, 山口容平, 芳澤信哉, 陳何苗, 岡田健志, 杉山みなみ, 下田吉之, 林泰弘, ‘住宅・業務施設を統合化した地域エネルギー需給シミュレーション: 東京 4 区市を対象とするケーススタディ’, 第 38 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp. 23 - 28, 2020

山口容平, 秋沢琴音, 北村拓也, 金範竣, 下田吉之, ‘ボトムアップモデルによる 2050 年における日本の業務部門エネルギー需要の推計’ 第 38 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp. 126 - 131, 2020

秋沢琴音, 山口容平, 金範竣, 鳴川公彬, 下田吉之, ‘日本全国の業務施設ストック経年変化を考慮したエネルギー需要推計’ 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. 85 - 90, 2021

(5) 公開したライブラリなど

(6) その他（特許, プレスリリース, 著書等）

7. 参考文献

- 1) 内閣官房：地球温暖化対策計画，2016 年 5 月 13 日閣議決定，<https://www.env.go.jp/press/files/jp/102816.pdf>
- 2) 環境省：日本の温室効果ガス排出量の算定結果，2015 年度（平成 27 年度）温室効果ガス排出量，<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/>
- 3) 資源エネルギー庁：長期エネルギー需給見通し関連資料，平成 27 年 7 月，http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/（アクセス日 2016.11.25）
- 4) 環境省：報道発表資料 温対法に基づく政府及び地方公共団体実行計画における温室効果ガス総排出量算定に用いる平成 25 年度の電気事業者ごとの排出係数等の公表について（お知らせ），平成 26 年 12 月，<http://www.env.go.jp/press/19009.html>（アクセス日 2016.11.25）
- 5) Kim B, Yamaguchi Y, Kimura S, Ko Y, Ikeda K, Shimoda Y. Urban building energy modeling considering the heterogeneity of HVAC system stock: A case study on Japanese office building stock. Energy Build 2019;199:547–61. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.07.022>.
- 6) EnergyPlus, EnergyPlus 8.6.0, September 2016, <https://energyplus.net/>, 最終アクセス日 2017 年 4 月 12 日

- 7) Ko, Y., Yamaguchi, Y., Miyachi, Y. Kim, B., Kimura, S., Ikeda, K., Shimoda, Y. Simulation based analysis on the influence of occupants' presence on energy consumption of office buildings, Proceedings of ASim2016
- 8) 一般社団法人環境共創イニシアチブ:平成 23 年度「エネルギー管理システム導入促進事業費補助金」(BEMS)実績報告データ, <https://www.ems-opendata.jp/>(最終アクセス日:2020.02.18)
- 9) 秋沢琴音, 山口容平, 金範峻, 鳴川公彬, 下田吉之: 業務部門における建築設備ストック経年変化のモデリング, エネルギー・資源学会論文誌 41(6) 318-327 2020 年 9 月, https://doi.org/10.24778/jjser.41.6_318