

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04463

研究課題名(和文) デマンドレスポンス評価を目的とする高時間解像度業務部門エネルギー需要モデルの開発

研究課題名(英文) High-temporal resolution energy demand modelling for commercial building stock and application for demand response

研究代表者

山口 容平 (Yamaguchi, Yohei)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40448098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は電力需給の状況に応じて電力需要を増減させるデマンドレスポンスに注目し、業務施設ストックが有する電力需要調整能力を推計するモデルの開発を行った。開発モデルを用いて、現在および将来における日本の事務所、宿泊、医療、商業小売、学校施設における電力需要、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量を推計した。加えて、電力需要の調整を行うデマンドレスポンスの実施を想定し、ストック全体で提供可能な電力需要の変化を定量化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動を背景として早期のカーボンニュートラルの実現が議論されている。そのためには、各種省エネルギー技術、再生可能エネルギー技術の普及、電化を含むエネルギーの転換、再生可能エネルギー等カーボンフリーエネルギー源の出力に合わせた時間的・量的な需要の形成(エネルギー管理)を推進する必要がある。これらを考慮して将来のエネルギーシステムの構成、運用、結果としての二酸化炭素排出量を検討することは重要であるが、開発したモデルは様々な技術の変化が同時に生じた将来を模擬して日本の業務施設のエネルギー需要、電力需要の調整力を推計可能であり、上記の検討において日本の業務施設ストックを考慮可能とすることができた。

研究成果の概要(英文)：This study established methods to model the composition and energy demand of the Japanese commercial building stock. An energy demand model was developed based on the so-called engineering bottom-up approach using building archetypes. The model is capable of quantifying the energy demand at the present and future considering the change in the composition of the building stock and technologies used in the stock. The model was used to estimate the potential reduction in the carbon dioxide emissions as well as the demand response potential which is the amount of electricity demand that can be reduced or increased by changing the operation of buildings.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：業務部門 エネルギー需要モデル デマンドレスポンス 建築設備 設備運用

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

電力システムの状況に応じて電力需要を調整するデマンドレスポンス（以下 DR とする）が注目されている。これまでに実施された DR の社会実証により、本研究が研究対象とする業務部門は大きな電力需要調整能力を有することが明らかにされている。一方、これらの実証試験では比較的大型の施設を対象とすることが多く、規模や用途、気象条件等が異なる様々なストックが集積する状況を考慮すると、実証試験により得られた結果を単純に拡大解釈することは信頼性に問題がある。DR による電力需要調整能力は設備の稼働時間帯や、設備が生産するサービス量の変更によってもたらされるものであり、その定量化には業務施設の建築仕様、設備仕様、使われ方、気象条件等の条件依存性を考慮する必要がある。そのため、それらの要因を考慮してエネルギー需要が決定される構造を再現した上で、調整能力を定量化する「シミュレーション」によるアプローチが有効であると考えられる。一方で、シミュレーションにより電力需要調整能力を推計する既往研究の多くは施設単位のものであり、ストック（電力需要家）全体を対象とするものには、業務施設ストックの多様性の考慮、現実的な施設・機器・設備稼働条件の想定、将来の時間断面を想定した評価実施可能性などに課題があった。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、①日本全国の業務施設を対象としてエネルギー需要、特に、時刻別の電力需要を推計可能であること、②建築・設備のストックにおける将来的な変化を考慮してエネルギー需要の推計が可能であること、③日本全国の業務施設を対象として代表的な DR 手法によってもたらされる電力需要の変化を定量化可能であることを要件としてモデル開発を行った。対象は日本の事務所、宿泊、医療・福祉、商業小売、学校ストックとした。開発したモデルを用いて、2013年、2030年の時間断面を想定してエネルギー需要、二酸化炭素排出量の変化、DR によりもたらされる電力需要調整能力を推計した。

3. 研究の方法

本研究で開発したモデルの概要を図1に示す。本開発は、Archetype Engineering Bottom-up Modelling と呼ばれる方法に基づくものである¹⁾。本手法では、エネルギー需要に大きな影響を持つ属性に基づいて業務施設ストックを類型化する。次に、類型別に類型を代表する業務施設を設計し、これを代表モデルと呼ぶ。代表モデルを入力条件として建築の運用シミュレーションを行い、得られた結果を代表モデルの延床面積で除し、類型別のエネルギー需要原単位を定量化する。最後にエネルギー需要原単位と類型別の延床面積の積和を行い、日本全国の業務施設ストックにおけるエネルギー需要を定量化する。代表モデルの設計とエネルギー需要のシミュレーションによって業務施設でエネルギー需要が決定される構造を反映したうえで、ストックの類型化過程、エネルギー需要の積み上げ過程により対象とする建築ストックのエネルギー需要を定量化することができる。加えて、現実的な機器・設備の運用条件を想定することによって、導入技術の相互作用を含めて、DR の導入効果をはじめ、将来における技術的な変化がもたらさうるエネルギー需要の変化を定量化することが可能である。

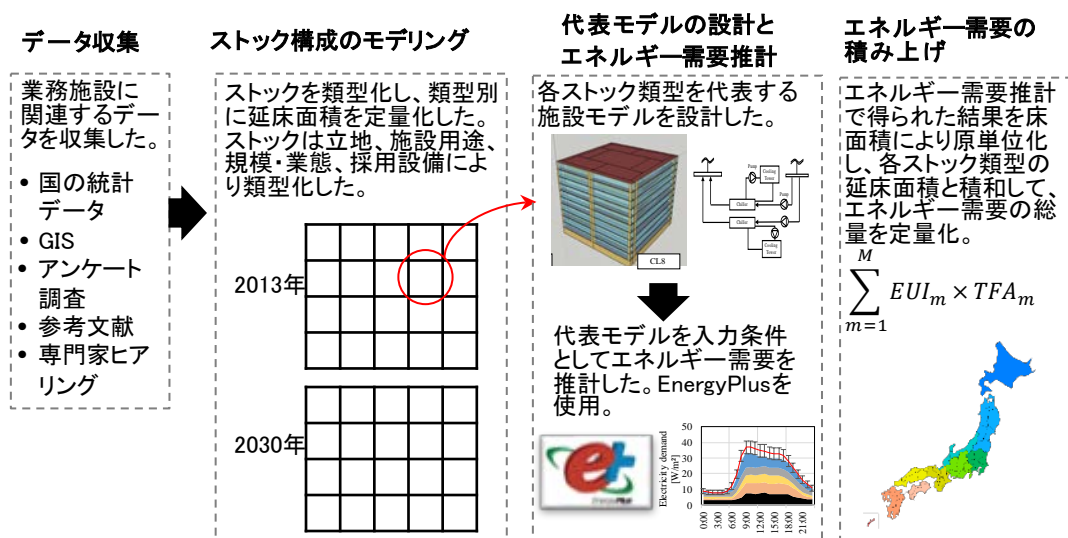


図1 研究の実施内容と開発したエネルギー需要モデルの概要

¹ Swan LG, Ugursal V.I.: Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 13, pp. 1819-1835, 2009.

4. 研究成果

4. 1 設備採用状況の推計結果

本研究ではエネルギー需要に大きな影響を及ぼす因子として業務施設の立地、規模、用途、建築設備種別を考慮して業務施設を類型化し、類型別の施設床面積を定量化した。これまでに建築設備種別のストック構成を推計する方法論は確立されておらず、推計方法を確立するとともに、2013年、2030年の業務施設ストックの構成を推計した²。

開発手法では、利用可能な統計データから日本全国の業務施設用途別延床面積総量を与え、次に規模・業態、立地地域、設備区分別の内訳を定量化する。建築設備の種別については、空調熱源・空調システム、給湯システムについて多種の選択肢がある。加えて、省エネルギー手法の採用までを考慮すると、その組み合わせは膨大となる。そこで本研究では、新築・改修が行われた建築物で採用された設備種別、仕様を取りまとめた竣工設備データに収録されている各業務施設の設備採用状況に基づいて、空調用の熱源システム、空調システム、給湯システム、省エネルギー手法の主要な組み合わせをそれぞれ決定し、任意の業務施設において設備区分を採用する確率を推計するロジスティック回帰モデルを開発した。最後に、回帰モデルを日本全体の業務施設ストックに適用することにより、各設備区分の集積状況を推計した。本推計を通して、大きな経年的なトレンドとして、中央熱源方式から個別熱源方式へのシフトが進んでいること、それに伴い電気駆動の熱源システムと、電気、ガスの両方を使用する複合熱源の比率が増加していること、将来にわたって省エネルギー手法を多く採用した業務施設が増加することがわかった。

4. 2 業務施設ストックのエネルギー需要モデリング

前述の方法論に従い、実存する業務施設ストックに関する情報収集を行い、前節で推計したストック類型別に代表モデルを設計した。代表モデルを用いてエネルギー需要の推計を行い、推計精度を確認した。加えて、2013年から2030年までに起こりえる技術的変化を想定し、対象ストックにおけるエネルギー需要及び二酸化炭素排出量の変化を推計した。

開発モデルの特徴は、建築設備の多様性およびストック構成を考慮していること、施設利用者の滞在スケジュールを確率モデルにより乱数生成し、現実的な施設稼働条件を設定していることにある。一つ目の点については前節に説明したストック類型と類型別延床面積を使用することで達成された。二つ目の点は、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確率的に決定し、施設利用者の滞在状況と関連付けて機器・設備の稼働状況を模擬することで実現した。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エネルギー需要を推計することができる³。施設別の月別一次エネルギー消費量について、日本サステナブル建築協会が公開している DECC データベース、時刻別電力需要については環境共創イニシアチブが公開している時系列電力需要データに基づいて精度検証を行い、規模・用途別の平均値を高い精度で推計できていることを確認した。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。エラーバーは実態値の2×標準誤差の区間を示しており、推計結果はおおむね誤差範囲に収まっている。

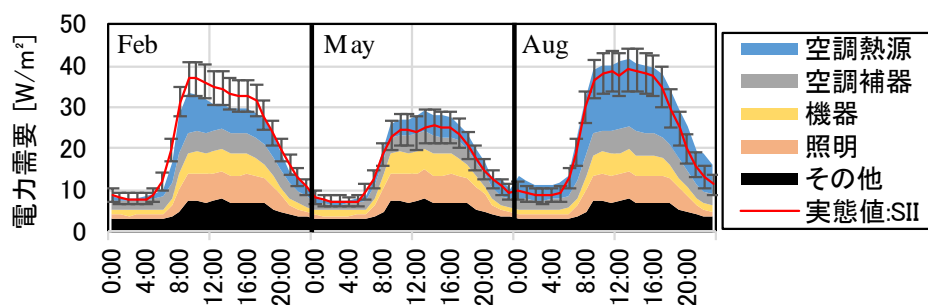


図2 中規模事務所ビルの電力需要推計結果（面グラフ）と実測値（Measured）の比較

開発モデルにより推計された対象ストックの2013年における一次エネルギー消費量を図3に示す。図では左から燃料種別、施設用途別、最終用途別、地域別に集計結果を示している。開発モデルの仕様によって、ここに示したように内訳を含めてエネルギー需要の定量化が可能となった。また、右の図に示すように、2013年から2030年にかけて、各種省エネルギー技術の普及、照明、コンセント機器、熱源機器の効率向上、ストック構成の変化により一次エネルギー消費量は24%減少すると推計された。また、推計された対象ストックの電力需要を図4に示す。2013年のストックにおける電力需要は冬期2月の平均値で日最大40GW、中間期5月に30GW、8月に50GWと推計された。2030年では、中間期、冬期に約10GW、夏期では20GW程度、ピーク時刻に

² Yamaguchi Y, Miyachi Y, Shimoda Y. Stock modelling of HVAC systems in Japanese commercial building sector using logistic regression. Energy Build 2017;152:458–71. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.007>.

³ 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;109590. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109590>.

おける電力需要が減少すると推計された。電源計画ではこのオーダーの需要減に備える必要があると考えられる。

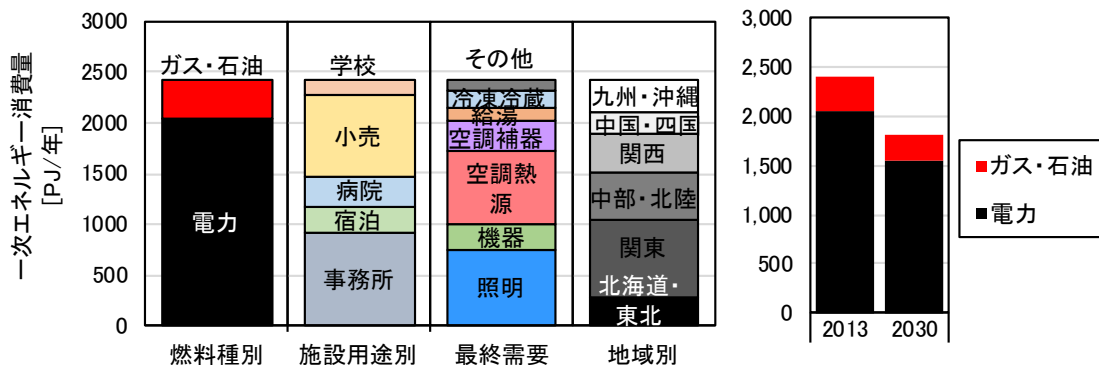


図3 2013年、2030年における一次エネルギー消費量推計結果

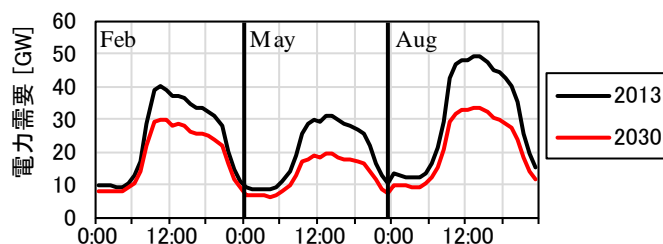
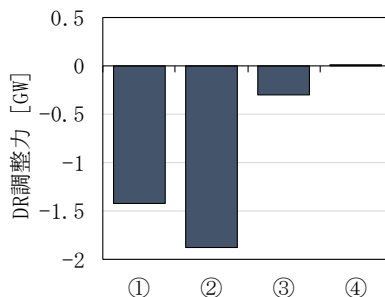


図4 2013年、2030年における電力需要推計結果

4. 3 DRポテンシャルの推計

開発モデルを用いて、代表的なDRを想定し、DRの実施よりもたらされうる電力需要の変化を推計した⁴。図5に関東地方における対象施設を対象として推計された結果を示す。図では、表に示すDRを実施したことにより得られる電力需要の変化を示す。対象とした期間は8月であり、13時から15時の間にDRが実施されることを想定した。また、DRの実施により快適性が損なわれると考えられることから、PMVが±0.5の範囲で制御が行われることを想定した。この結果、施設単位の実施効果とストックにおける対象床面積の存在量が重要な因子になることがわかった。例えば、空調機の設定温度緩和、予熱は多くの施設が実施可能であり、電力需要の調整力が大きい。一方、蓄熱システムにおける蓄熱時間帯の変更は、施設単位では非常に大きな効果があり安定した調整力が得られるが、蓄熱を採用している施設がストックにおける比率が小さく、全体としては調整力が小さい。このような知見は既往研究では得られていなかった。



対象機器	DR手法	対象ストック
① 空調機	冷房設定温度緩和 (26℃から27℃に1℃)	関東・全建物
② 空調機	予冷	関東・全建物
③ 空調機 (蓄熱式)	蓄熱槽からの集中放熱	関東・ 蓄熱式空調システムを採用した建物
④ 業務用HP給湯機	運転スケジュール変更	全国宿泊施設の10%HP給湯機を普及

図5 代表的なDRによる電力需要調整力推計結果

⁴ Chen Hemiao, Yohei Yamaguchi, Kosuke Ikeda, Bumjoon Kim, Takuya Kitamura, Kotone Akizawa, Yoshiyuki Shimoda, A simulation-based estimation of Demand Response Potential of Japanese Commercial Building Stock, Proceedings of Sustainable Built Environment Conference 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kim B, Yamaguchi Y, Kimura S, Ko Y, Ikeda K, Shimoda Y.	4. 巻 199
2. 論文標題 Urban building energy modeling considering the heterogeneity of HVAC system stock: A case study on Japanese office building stock.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 547-561
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.07.022 .	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Y, Miyachi Y, Shimoda Y.	4. 巻 152
2. 論文標題 Stock modelling of HVAC systems in Japanese commercial building sector using logistic regression	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 458 ~ 471
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Chen Hemiao, Yohei Yamaguchi, Kosuke Ikeda, Bumjoon Kim, Takuya Kitamura, Kotone Akizawa, Yoshiyuki Shimoda
2. 発表標題 A simulation-based estimation of Demand Response Potential of Japanese Commercial Building Stock
3. 学会等名 Proceedings of Sustainable Built Environment Conference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Kitamura, Kotone Akizawa, Yohei Yamaguchi, Bumjoon Kim, Yoshiyuki Shimoda
2. 発表標題 Development of Energy Demand Estimation Model of Japanese Commercial Building Considering Diversity of Energy Conservation Measures
3. 学会等名 Proceedings of Building Simulation 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口容平, 陳何苗, 下田吉之
2. 発表標題 業務用ヒートポンプ給湯機における電力需要調整力の推計
3. 学会等名 第38回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋沢琴音, 山口容平, 金範俊, 北村拓也, 陳何苗, 下田吉之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第38回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋沢琴音, 山口容平, 金範俊, 北村拓也, 陳何苗, 下田吉之
2. 発表標題 業務施設における空気調和関連設備ストックのモデリング
3. 学会等名 2019年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陳何苗, 池田浩介, 金範俊, 北村拓也, 秋沢琴音, 山口容平, 下田吉之
2. 発表標題 宿泊施設の業務用ヒートポンプ給湯機による電力需要調整可能量の推計
3. 学会等名 2019年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北村拓也, 山口容平, 秋沢琴音, 金範俊, 鳴川公彬, 下田吉之
2. 発表標題 空調関連の省エネルギー技術による業務施設ストック二酸化炭素排出削減可能性評価
3. 学会等名 第36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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 KIM Bumjoon, YAMAGUCHI Yohei, IKEDA Kosuke, KITAMURA Takuya, SHIMODA Yoshiyuki
2. 発表標題 Development of Energy Demand Model of Japanese Commercial Sector
3. 学会等名 第37回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田耕介, 金範俊, 北村拓也, 山口容平, 下田吉之
2. 発表標題 日本全国の業務施設ストックにおける給湯システムの採用状況とエネルギー需要の推計
3. 学会等名 2018年度空気調和・衛生工学会大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北村拓也, 山口容平, 金範俊, 池田耕介, 下田吉之
2. 発表標題 日本全国の商業施設ストックにおけるエネルギー需要の推計
3. 学会等名 2018年度空気調和・衛生工学会大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 KIM Bumjoon, YAMAGUCHI Yohei, IKEDA Kosuke, KITAMURA Takuya, SHIMODA Yoshiyuki
2. 発表標題 Development of energy demand model for Japanese commercial sector based on Archetype Engineering Modelling method
3. 学会等名 2018年度空調和・衛生工学会大会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口容平, 北村拓也, 秋沢琴音, 金範俊, 陳何苗, 池田耕介, 下田吉之
2. 発表標題 日本の業務部門における二酸化炭素排出量削減可能性の検討
3. 学会等名 第35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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Ikeda, B. Kim, H. Chen, T. Kitamura, Y. Yamaguchi, Y. Shimoda
2. 発表標題 Urban Scale Energy Demand Modelling for Japanese Commercial Building Stock Using Archetypes Considering Building Operation Condition
3. 学会等名 Proceedings of ASim2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田耕介, 木村舜, 黄雄明, 金範俊, 山口容平, 下田吉之
2. 発表標題 近畿圏業務施設における給湯エネルギー需要と業務用 HP 給湯機の電力需要調整能力の推計
3. 学会等名 2017年度空調和・衛生工学会学術講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黄雄明、山口容平、金範俊、木村舜、池田耕介、下田吉之
2. 発表標題 パーソントリップ調査に基づく事務所ビルの執務者在室状況・エネルギー消費推計
3. 学会等名 2017年度空調和・衛生工学会学術講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村舜、山口容平、金範俊、黄雄明、池田耕介、下田吉之
2. 発表標題 日本全国の業務施設ストックにおけるエネルギー需要の推計
3. 学会等名 2017年度空調和・衛生工学会学術講演論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kimura, S., Yamaguchi, Y., Kim, B., Miyachi, Y., Kou, Y. Shimoda, Y.
2. 発表標題 Urban Scale Energy Demand Modelling of Commercial Building Stock Considering the Variety of HVAC System Configuration
3. 学会等名 Proceedings of BS2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金範俊、山口容平、木村舜、黄雄明、池田耕介、北村拓也、下田吉之
2. 発表標題 日本の業務部門を対象とするエネルギー需要モデルの開発：事務所建物を対象として
3. 学会等名 エネルギー・資源学会第34回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口容平, 木村舜, 池田耕介, 黄雄明, 金範俊, 下田吉之
2. 発表標題 2050年に向けた日本のエネルギー需給検討 業務部門電力需要の推計
3. 学会等名 エネルギー・資源学会第36回エネルギー・資源学会研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ko, Yumei; Yamaguchi, Yohei; Miyachi, Yusuke; Kim, Bumjoon; Kimura, Shun; Ikeda, Kosuke; Shimoda, Yoshiyuki
2. 発表標題 Simulation based analysis on the influence of occupants' presence on energy consumption of office buildings
3. 学会等名 The 3rd Asia Conference of International Building Performance Simulation Association (ASim) 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮地優介, 山口容平, 下田吉之
2. 発表標題 全国の業務建築ストックにおける空気調和設備の採用比率の推計
3. 学会等名 2016年度エネルギー・資源学会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
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黄雄明, 山口容平, 宮地優介, 金範俊, 木村舜, 下田吉之
2. 発表標題 事務所ビルを対象とするフロア稼働状況変動とエネルギー消費への影響
3. 学会等名 2016年度空気調和・衛生工学会学術講演論文集第5巻, pp. 209-212
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 金範俊, 山口容平, 宮地優介, 黄雄明, 木村舜, 下田吉之
2. 発表標題 空調熱源設備の集積状況を考慮した近畿圏大規模事務所ビルストックのエネルギー需要推計
3. 学会等名 2016年度空調和・衛生工学会学術講演論文集第9巻, pp. 113-116
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 池田耕介, 宮地優介, 金範俊, 黄雄明, 木村舜, 山口容平, 下田吉之
2. 発表標題 業務施設の給湯エネルギー需要と業務用HP給湯機による電力需要調整能力の推計
3. 学会等名 第46回空調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表論文集
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	下田 吉之 (SHIMODA Yoshiyuki) (20226278)	大阪大学・工学研究科 ・教授 (14401)	