

施設毎の需要特性を反映した省エネ計画に向けた 筑波大学の電力消費パターン分析

リスク工学グループ演習6班

北村拓也 河野健一 鈴木雄太 陳康

アドバイザー教員：鈴木研悟

2016/10/21

1 はじめに

地球温暖化問題が世界共通の課題として提起されており、二酸化炭素の排出の削減については地球規模で取り組んでいかなければならない問題である。省エネルギー対策の一環として2003年より「改正省エネルギー法」が施行され、大学も同法に適応される。大学のエネルギー消費は研究の高度化に伴って増加傾向にある[1]。電力消費を抑えることは地球温暖化問題のほか、大学運用のコスト削減の点でも利点がある。筑波大学では省エネ対策の一つとして、全学の電力使用状況をリアルタイムで把握できる「TEMS(University of Tsukuba Electricity Monitoring System)」を導入している[2]。同学では大学職員や学生に呼びかける啓発活動や設備の更新などの対策を進めているが、今後さらなる省エネを求められており、そのためには、各施設における電気需要を把握することが重要である。

大学の電力需要を推測する手法として、以下の研究が挙げられる。謝ら(2006)[3]は、山口大学で使用された2002年の消費電力データを対象に各月、時間帯において、電力需要に対する外気温の影響開始気温や電力需要に対する外気温の影響を明らかにしている。吉田ら(2016)[4]は、大阪大学の文科系施設と理科系施設、大規模施設を対象に、それぞれの施設の消費電力と外気温の関係を分析しており、施設ごとや時間帯ごとに、外気温との関係が異なることを示している。いずれの研究も、空調等の熱機器の利用による夏季、冬季のピークカットを目的としているため、電気需要に対する外気温の影響に焦点を当てている。しかしながら、時間帯ごとの外気温の影響の違いには焦点を当てているものの、施設利用者の電力需要に直接影響していると予想される、時間スケールにおける電力需要に関しては十分に分析されていない。省エネルギー対策を検討する場合、ピークカットを実施するのみでは限界があり、各施設において、1年間の電力を総合的に節約していく必要がある。そこで、本研究では電力需要に対する外気温の影響だけでなく、時間スケールで

の電力需要の違いに焦点を当てる。

以上より、現行の省エネ・節電計画をより推進していくために、施設ごとの電力消費パターンを分析し、施設ごとの電力需要特性を明らかにする。その後、電力消費の習慣を表す時間スケールおよび外気温に対する電力需要特性に基づいて施設を分類することで、施設ごとの省エネを検討できるのかを考察する。

2 事前調査

2.1 施設部へのヒアリング調査

筑波大学の省エネ活動の現状把握を目的としてヒアリングを行った。2016年6月21日の10時から、施設部施設サービス課にて、施設部施設サービス課の職員2名に対して行った。

ヒアリング結果

筑波大学はピークカットよりも省エネを重視していることがわかった。省エネ法で定められている通り、毎年、CO₂排出量を前年比1%減とすることを目標としているためである。ピークカットはコスト削減に繋がるが、CO₂排出量削減には繋がらない。現在その目標は達成できているが、今後も継続して達成し続けることが必要である。

現在直面している問題としては、各施設でどのような使い方がどのくらい電力を消費しているかがあまりよく分かっていないことが挙げられた。

2.2 TEMS データの整理

TEMS(筑波大学電力情報システム)[2]とは、筑波大学の各施設における1時間毎の電力使用状況を記録したデータベースシステムである。なお、TEMSにおける1時間の消費電力は、その時間内の10分から15分の平均キロワットによって算出される。図1は、総合研究棟Bの例である。

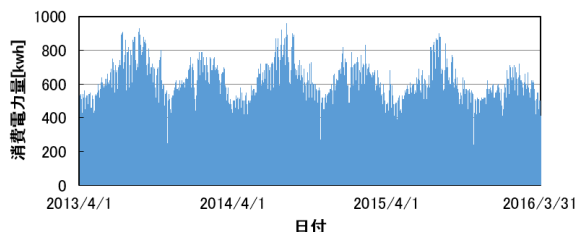


図 1: 3年間の消費電力量の推移

3 施設別電力消費量の集計

3.1 方法

分析は以下の2つの期間について行った。

3年(2013年4月1日～2016年3月31日)

目的は、各施設について、3年間における消費電力の推移を調査することである。各施設の消費電力データを18区分に整理した。具体的には、季節(春秋:3月～5月,9月～11月 / 夏:6月～8月 / 冬:12月～2月),平休日,年次(1～3年)に分類し、それぞれの区分における平均消費電力を算出した(図2は総合研究棟Bの例)。

1年(2015年4月1日～2016年3月31日)

目的は、各施設について、時間スケールによる消費電力の推移を調査することである。各棟の電力データを18区分に整理した。具体的には、季節(同上),平休日,時間帯(深夜:1時～9時 / 日中:9時～17時 / 夜:17時～25時)に分類し、それぞれの区分における平均消費電力を算出した(図3は総合研究棟Bの例)。

3.2 結果

以下、例として総合研究棟Bの考察を行う。

年による電力消費の推移(図2)に注目すると、以下のことが推測できる。

春秋は電力消費が小さくなり続けていることから、冷暖房に関係ない電力が小さくなり続けている。一方夏および冬は、1年目および2年目はほぼ変わらず、3年目に突然減少しているため、2年目に冷暖房が多く使われたことになる。つまり夏暑く、冬寒いと感ぜられる年であった。実際、2年目の冬(2014年12月～2015年2月)は多くの寒波による寒冬であり、夏(2015年6

月～8月)は平均気温としては平年並みであるものの猛暑と言われている。

時間による電力消費の推移(図3)に注目すると、以下のことが推測できる。

まず、深夜が小さいこと、そして休日より平日の方が大きいことから、人の出入りのある施設である。また、日中と夜が同程度であることから、講義が少ない施設である。そして、春秋より夏冬の方が大きいため、冷暖房設備がある。

以上のように、時間帯をカテゴリに分けて電力消費パターンを考察することが、各施設について可能である。そのため、どのカテゴリでどの程度電力を消費しているか、詳細に把握することが可能である。しかし、そのためには一つ一つの施設を全て人の目で見に行く必要がある。また、この方法では、研究者が恣意的に選んだ時間スケールのみしか電力需要を把握できない。大学が施設単位で省エネ対策を推進していく場合、まずは、各施設の大雑把な電力消費パターンを大学全体で把握し、似た施設同士の分類、その後各施設ごとの詳細な事情の把握といった、段階的な調査が必要になると考える。そこで、我々はそれを解決するために、フーリエ変換によって電力消費パターンの特徴を抽出し、クラスタリングによって分類する手法を検討した。

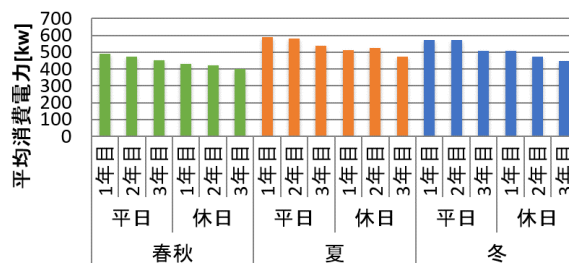


図 2: 年による電力消費の分析例

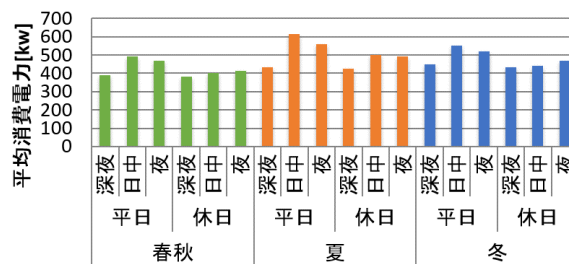


図 3: 時間による電力消費の分析例

4 フーリエ変換およびクラスタリングによる電力消費パターン

4.1 フーリエ変換によるスペクトル分析

4.1.1 方法

様々な時間スケールを一元的に把握する方法として、フーリエ変換による周波数解析を行う。周波数解析とは、時系列の信号データを周波数領域に変換し、どの周波数成分がどの程度強いのか(パワースペクトル)等を分析する手法である。本研究では、周波数解析の1つである、フーリエ変換を用いる。2015年4月1日から2016年3月31日までの1時間ごとの電力データに対して、離散フーリエ変換を行う。サンプル数 N 、周波数 $\frac{24f}{N} [\text{day}^{-1}]$ の離散フーリエ変換 $\mathcal{F}_N(f)$ は、式1で表される。

$$\mathcal{F}_N(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-i\frac{2\pi f k}{N}} \quad (f = 0, 1, \dots, N-1) \quad (1)$$

本研究では、離散フーリエ変換後の各周波数帯の絶対値の2乗(以下、パワースペクトル)を比較することで、各周波数域間の変動の大きさを施設間で比較する。パワースペクトル $X(f)$ を式2に示す。

$$X(f) = |\mathcal{F}_N(f)|^2 \quad (f = 0, 1, \dots, N-1) \quad (2)$$

また、施設間のパワースペクトルを比較する場合、総消費電力量の大小が異なるため、単純に比較することはできない。本研究で比較する対象は、電力データに含まれる変動成分の相対的な大きさであるため、パワースペクトルを、式3に表すように、相対化することで、施設間の比較を行う。本研究では、これを相対スペクトルと呼ぶ。

$$X_r(f) = \frac{X(f)}{\sum_{k=0}^{N-1} X(k)} \quad (f = 0, 1, \dots, N-1) \quad (3)$$

4.1.2 結果

まず、相対スペクトルが、施設の消費電力量の時間スケールにおける変動を表していることを示す。ここでは、総合研究棟Bを例に説明する。総合研究棟Bの相対スペクトルを図4、1年分、2週間分の消費電力の時系列データを図5、図6に示す。総合研究棟Bで相

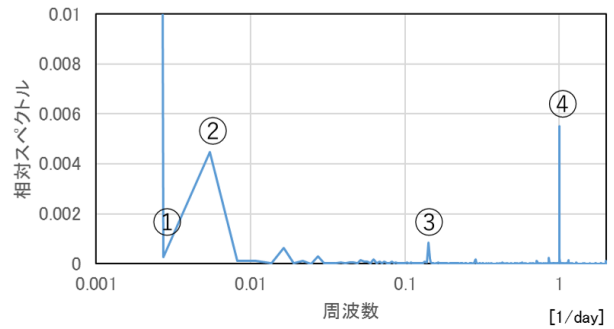


図4: 総合研究棟Bにおける相対スペクトル

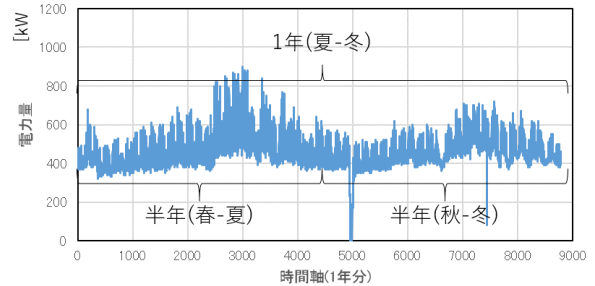


図5: 総合研究棟Bにおける1年間の電力推移(2015年4月1日~2016年3月31日)

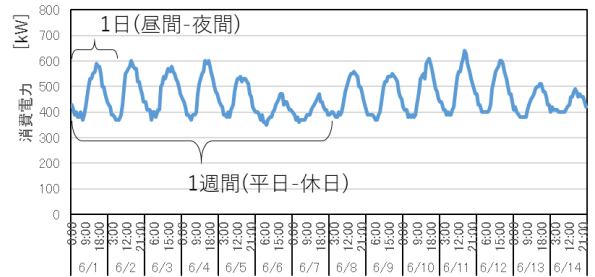


図6: 総合研究棟Bにおける2週間の電力推移(2015年6月1日~2016年6月14日)

対スペクトルが大きい周波数は、 $0[\text{day}^{-1}]$ を除くと、図4中の② $0.005[\text{day}^{-1}]$ 、③ $0.143[\text{day}^{-1}]$ 、④ $1[\text{day}^{-1}]$ の相対スペクトルであり、それぞれ半年周期、1週間周期、1日周期の消費電力の変動に対応する。一方、1年周期を表す図4中の① $0.0027[\text{day}^{-1}]$ の相対スペクトルは比較的小さく、1年周期による消費電力の変動はあまりみられない。図5、図6の時系列データと比較すると、確かに、1年周期(夏-冬)の変動は見られず、半年周期(春・秋-夏・冬)、1週間周期(平日-休日)、1日周期(昼間-夜間)の変動は確認できる。

周波数間で比較すると、1日周期、半年周期、1週間周期の順で相対スペクトル、つまり、消費電力の変動が大きいことがわかる。3章の議論を合わせると、総

合研究棟 B は、昼間、多くの学生や教員が活動するため非常に大きな電力を消費し、夏季・冬季の休業や空調の需要により夏や冬の電力消費量が大きいことが考えられる。一方、休日でも多くの学生や教員が活動しているため、1週間周期での変動は比較的小さいことが考えられる。

以上のように、平均値の議論では、直感的な比較が困難であったことが、相対スペクトルでは、一目で直感的に電力需要を把握することができる。ただし、変動の正負に関しては、把握できないため、平均値による補完的な分析や、位相スペクトルの分析によって把握する必要があり、今後の課題とする。

4.2 クラスタリング

前節で示したように、各施設の消費電力の時系列データより得た相対スペクトルの値は、それぞれ時間周期ごとの消費電力の変動の大きさを表している。この値を用いて、大学施設の電力需要をいくつかのグループに分類する方法を検討する。しかし、図4のようなデータから全施設の特徴を分類することは困難である。そこで本研究では、離散フーリエ変換で得られた相対スペクトルより、施設の特徴としてよく現れる、1日周期、1週間周期、半年（春夏と秋冬）周期、1年（冬と夏）周期の相対スペクトルを抽出し、4次元のデータセットを構築し、階層的クラスタリングを応用し、データ間で非類似度の小さいデータ同士を比較することで各施設を分類し、特徴を考察する。

4.2.1 方法

使用するデータセットは、電力データに不具合がなかった62の施設を対象として、1年周期、半年周期、1週間周期、1日周期を表す周波数の相対スペクトルを抽出したものを、4次元データとして

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}) \quad (4)$$

と記述する。 i は今回分析対象とした1から62までの施設の番号を示している。 x_{i1} は1年（冬と夏）、 x_{i2} は半年（春夏と秋冬）の、 x_{i3} は1週間、 x_{i4} は1日の相対スペクトルを示す。 \mathbf{x}_i のデータセットに階層的クラスタリングのward法を用いて樹形図を出力し、データ間の関連と意味を考察する。

4.2.2 結果

図7に階層クラスタリングによって得られた樹形図を示す。図中には各施設で抽出した4つの周波数の相対スペクトルを積み上げ棒グラフとして重ねている。樹形図は、非類似度の小さいデータ同士が結合していく過程を示している。

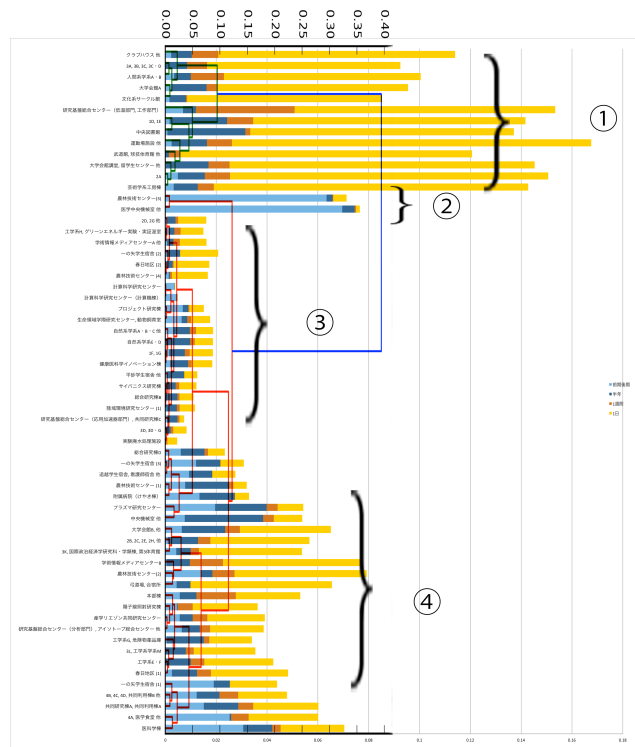


図7: ward法によって出力された樹形図

結果よりグループを主観的に決定する。①は一日の相対スペクトルが大きいデータが集まっており、中央図書館や運動場設備等を含む「電力消費に時間が影響し、とりわけ一日の中で電力消費の変動が大きいグループ」である。②は1年の相対スペクトルが大きいデータが集まっており、医学中央機械室や農林技術センターを含む「冬と夏で全く電力消費の異なるグループ」である。③は $|x_i|$ が小さく、相対スペクトルの小さいデータが集まっており、計算科学研究センターや実験排水処理施設等を含む「時間に影響されず、常に同じような電力消費を行っているグループ」である。④は比較的小さい変動の値が均一なデータが集まっており、本部棟や附属病院（けやき棟）等を含む「複雑な用途で使用されているグループ」である。

①は夜間はほとんど締め切っている施設が多いと予

測でき、日中での電力消費を調査するといったアプローチをとることができる。②は空調機器を主に扱っているため、冬と夏で電力需要の変動が生じるのではないかと予測でき、空調の使用や設備に対して調査するといったアプローチをとることができる。③は時間による電力需要の変動が小さいため、深夜帯の電力消費など電力消費のベースの部分の部分を調査するといったアプローチをとることができる。④は一見すると複雑な用途で使用されている施設であるが、電力需要に偏りがある可能性も考えられる。例えば、電気の消し忘れなどが多く x_{i4} の値が小さいなどがある。それぞれの施設で電力使用の用途を調査するなどのアプローチが考えられる。

5 外気温による電力消費パターン

5.1 方法

既往研究でも言われているとおり、空調等の熱機器の需要や効率は、施設の電力需要に影響する。本章では、各施設の消費電力と外気温の関係を気温帯域ごとに回帰分析を行い、各施設の外気温による電力消費パターンを明らかにし、各施設の外気温に対する電力需要の特性を明らかにする。筑波大学内の施設(合計62ヶ所)の2015年4月1日から2016年3月31日までの日ごとの消費電力量(KWh)を従属変数とし、同期間内のつくば市の1日平均気温をを説明変数として、14.5度以下(冬場)と21.5度以上(夏場)それぞれで回帰分析を行い、冬場と夏場の標準化係数を分類した。冬場・夏場の外気温の閾値は、謝ら(2006)[3]の結果を援用した。

5.2 結果

5.2.1 消費電力に対する外気温の影響

総合研究棟Bにおける気温と消費電力量の関係を図8に示す。冬場、夏場、その他といったように、外気温の増減に対する消費電力の増減には、なんらかの関係があることが確認できる。各施設の冬場(横軸)と(縦軸)の標準化係数をの散布図を図9に示す。標準化係数の絶対値が大きいほど、気温の上下に対する消費電力の増減が大きい。一方、標準化係数の符号は、冬場の

場合、負ならば、気温が低下するほど消費電力が大きくなることを表し、夏場の場合、正ならば、気温が上昇するほど消費電力が大きくなることを意味する。つまり、散布図の第2,3象限で、左に分布するほど、冬場において気温の低下によって電力需要が増加する施設であることを意味し、第1,2象限で、上に分布するほど、夏場において気温の上昇によって電力需要が増加する施設であることを意味している。

5.2.2 特徴

図9のように、ほとんどの施設は第二象限に位置し、夏場には、外気温が高くなるほど消費電力が大きくなり、冬において外気温が低いほど消費電力が小さくなるのがわかる。一方、一部の施設では、第1象限の左上に位置し、夏場のみ外気温の影響があり、気温の上昇によって消費電力が大きくなるのがわかる。このことから、筑波大学の全施設における電力需要の特性は、電力需要に対して冬場と夏場に外気温の影響がある施設、電力需要に対して夏場のみ外気温の影響がある施設、外気温の影響が小さい施設の3つの分類が考えられる。

電力需要に対して冬場と夏場に外気温の影響がある施設

筑波大学のほとんどの施設が位置している第2象限の施設は、冬場において気温が低下するほど電力需要が大きくなり、夏場において気温が上昇するほど電力需要が大きくなると考えられる。具体的な施設を挙げると、①総合研究棟D (-0.896, 0.893), ②外国人教師等宿泊施設 (-0.863, 0.905), ③追越学生宿舎, 看護師宿舎 (-0.819, 0.911) などであり、日常的に営みがあり、空調等の熱機器が生活の一部として利用されている施設であることが推察でき、左上に位置するほど、熱機器の使用状況に焦点をあてて省エネ対策を進める必要があると推察できる。

電力需要に対して夏場のみ外気温の影響がある施設

夏場においてのみ、気温の上昇によって電力需要が大きくなり、冬場は外気温の影響が小さい施設である。具体的な施設を挙げると、①計算科学研究センター (0.084, 0.365), ②農林技術センター2 (0.016, 0.641), ③医学中央機械室 (0.274, 0.787),

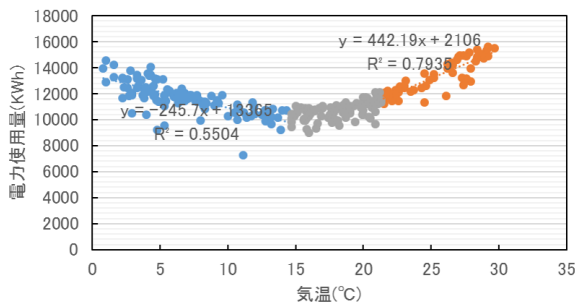


図 8: 消費電力量と外気温の関係 (総合研究棟 B)

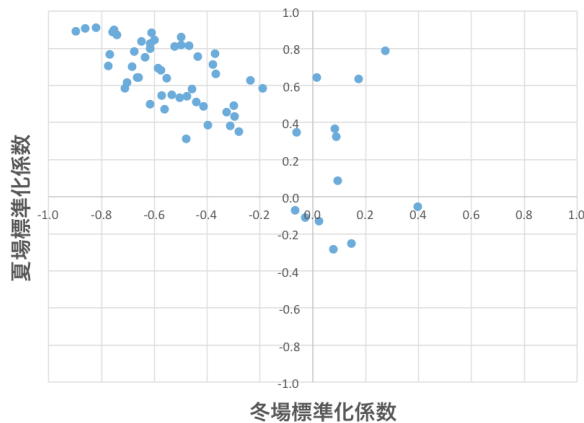


図 9: 夏場と冬場の電力消費パターン

④陽子線照射研究棟 (0.172, 0.634) などがあり、コンピュータ等の周辺温度を一定に維持するような設備が占めている施設であることが考えられ、設備のエネルギー効率といった点に焦点を当てて省エネ対策を進めるとよいと考えられる。

外気温の影響が小さい施設

原点付近に分布している施設であり、外気温によって電力需要の増減が小さい施設である。具体的な施設を挙げると、①実験排水処理施設 (-0.028, -0.110) ②武道館, 球技体育館 (0.077, -0.282), ③運動場施設 (0.147, -0.282) である。空調などの熱機器はあまり利用されていないため、1年通して利用されているため、外気温による電力需要への影響が小さいと考えられる。

6 結論

本研究では、以下のことが明らかになった。①時系列の消費電力データを分析し、時間スケールごとに消費電力の平均値を比較することで、施設の電力需要の

特性を考察できること。②施設の時間スケールでの消費電力の変動を、相対スペクトルとして定量的に表し、それが実際の時系列の変動に対応していること。③抽出したいくつかの周波数の相対スペクトルを用いたクラスタリングによって、施設を電力需要ごとの似たグループに分類することが可能であること。④消費電力と外気温の回帰分析によって、外気温に対する電力需要の特性を3つのパターンに分類できること。

今後、時間スケールの変動や外気温に対する電力需要の増減、分類結果が意味する電力需要の特徴を、実際の施設に実地調査を行い、検証することが必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ヒアリングへの協力およびデータの提供をしていただいた、筑波大学施設部施設サービス課中島慎二さん、施設サービス課の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 大学等に求められる省エネルギー対策”, http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afiefieldfile/2010/05/21/1291316_3.pdf, 文部科学省
- [2] “TEMS(筑波大学電力情報システム) <http://tems.tsukuba.ac.jp>” (最終閲覧日 2016年10月20日)
- [3] “大学構内における総使用電力からの空調用電力と非空調用電力の分離に関する研究”, 謝学海, 山下哲生, 中村安弘, 空気調和・衛生工学会論文集, No.116, pp.11-19, 2006
- [4] “大学キャンパスにおける夏期電力ピークデマンドの予測手法に関する研究”, 吉田友紀子, 下田吉之, 第35回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集 13-4, 2016