

福岡大学工学部における空調設備の省電力化手法の検討*

ホワイト ポール***

西 内 拓 海**

モシニャガ ワシリー**

橋 本 浩 二**

A Study of Air-conditioning Energy Saving Techniques in Fukuoka University Faculty of Engineering

Paul WHITE***, Takumi NISHIUCHI**, Vasily MOSHNYAGA** and Koji HASHIMOTO**

Energy consumption of heating and air-conditioning equipment is one of the major expenditures of university buildings. In this paper we describe three novel techniques for reducing energy consumption of air-conditioning in Faculty of Engineering, Fukuoka University. The first technique deals with energy-conscious class scheduling and assignment of classrooms to classes. The second technique combines the energy-conscious classroom assignment with the room partitioning and separate control for air-conditioners in the partitions. The third technique employs the sensors-based user detection and adaptive air-conditioning control to reduce energy consumption of offices and research laboratories. Simulation show that these techniques can lower the energy costs significantly without large investment in HVAC management tools.

Key Words : energy consumption, saving, timetable, classroom partition, optimization, sensors, HVAC

1. はじめに

日本においては1980年頃よりエアコンの普及や生活水準の向上, また高度情報化社会の進展によって電力消費が年々増加している. 1980年の年間発電量が4850億kWhに対して, 2005年の年間発電量は9880億kWhと25年で約2倍以上に増加している [1]. 2000年頃より, 省エネ技術の普及等により電力消費の伸びがかなり緩やかになっているものの, 今後, ICTの革新は持続的に進むことが予想され, また地球温暖化や電気自動車の普及も予想されていることから, 電気の重要性はいささかも揺らいでいない.

一方で, 2011年の東日本大震災の影響で, 国内のほとんどの原子力発電所が運転を停止している状況にあり, ほとんどを火力発電で賄っているのが現状である. 加えて, それまで全体の2割から3割の発電量を原子力で賄っていた日本は, 電力消費が非常に高くなる時期, 特に夏場において, 需要に対して供給不足が起こる危険性を抱えている. 実際, 2015年夏の九州電力管内では最大供給力1588万kWに対して需要予測が1643万kWと上回っており, 不足分の電力は他地区の電力会社から買うことで補った[2]. 今後も社会全体での消費電力削減は大きなテーマとなるであろう.

福岡大学では, 2008年より環境負荷の軽減に積極的に取り組んでおり, 構成員の環境マインドを育み, 地域社会の模範となることを目的とした「福岡大学地球温暖化防止推議」を設置し, 地球温暖化防止に向けたさまざまな取り組みを開始している[3]. しかし全エネルギー使

* 平成 28 年 5 月 31 日受付

** 電子情報工学科

*** 電子情報工学専攻博士課程前期

表1：福岡大学で取り組まれている省エネ策

No.	節電方法
1	職員の軽装（エコスタイル）の実施
2	お盆の一斉休暇（夏季特別休暇）を設定
3	冷房の温度を28℃に設定
4	エレベーター・自動ドアの稼働数を制限（7月1日～9月30日）
5	学内の噴水を停止（7月1日～9月30日）
6	照明の削減（蛍光灯球の間引き）
7	昼休み時間の照明電源OFF（学生サービス部署を除く）
8	OA機器等の節電機能の適切な利用
9	窓，出入口の開放を禁止（冷房使用中）
10	エアコンフィルター，照明器具の清掃

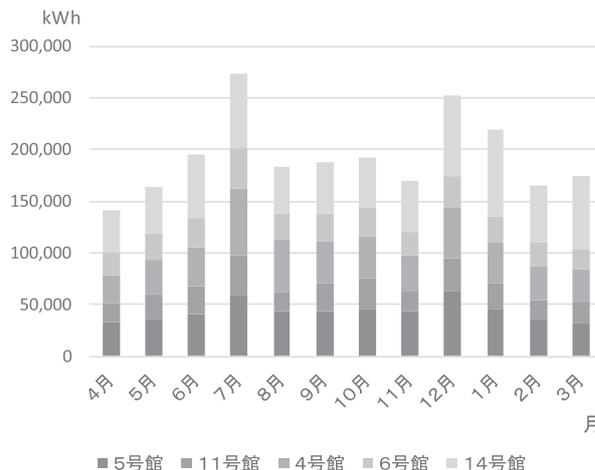


図1：工学部主要校舎の電力使用量(2014年)

用量の6～7割が電力であり最も消費量が多く、また漸増傾向にあるという状態は変わっておらず、今後も継続的な省エネ対策が求められている。例えば2016年度においても、5月1日から10月31日までの間、表1に掲げる省エネルギー化対策を実施している。

本学は全10学部・10研究科（人文・法・経済・商・商二部・理・工・医・薬・スポーツ科）によって構成されており、約1万8千人の学生が現在在籍している。その中でも工学部は約3千人の学生の在籍があり、本学において最大人数の学部となっている。工学部は機械・電気・電子情報・科学システム・社会デザイン・建築の6学科で構成されており、学部全体として、実験や実習が多いという特徴がある。工学部が使用している校舎は、主に5号館・11号館・4号館・6号館・14号館・流体工学実験室となっている。教員室は全部で45部屋、研究室は66部屋あり、その他多くの実験室が存在する。図1に2014年度の工学部施設における月別電力使用量の内訳を示している。4月・5月に比べて7月の数値が高いことから、7月に使用する冷房空調が電力使用量を引き上げており、また、12月・1月の数値が高いのも冬季の暖房使用によるものであると推測される。

本学では一般教養科目を除けば年間631の授業科目（2014年度）が開講される。工学部では事務職員と各学科の教員とがスケジュールに重複が無いよう時間割を計画し、学生が履修登録を行う。その後、教員の要望等も受けつつ教室の割り当てを行っている。しかし、実際に使用されている教室とその登録人数をみると、授業によっては大きな差が生じている。実例として、2014年前期火曜日6時限目に開講された電子情報工学科「論理回路（再）」は11号館2階1121教室が割り当てられたが、教室の収容人数192人に対し、登録人数は27人と大きな差があった。一般に、空調設備は部屋の広さ・収容人数に

応じて設置されるため、上記の教室では、無駄な電力消費が生じたと考えられる。もし登録人数にあった、より狭い教室でならば、空調の消費電力が削減できた可能性が高い。

そこで我々は、空調の消費電力を削減するために、消費電力量に考慮した授業の教室割り当ての最適化手法について提案する。加えて、パーティション（部屋の空間を仕切る可動壁）を用いることが可能であると仮定した場合における、消費電力量に考慮した授業の教室割り当ての最適化についても述べる。また、教員室・研究室の空調設備を対象として人感センサ制御を適用可能であると仮定した場合に、その効果についても論じる。

2. 空調消費電力量を考慮した教室割り当て最適化

2.1. モデル実験の概要

上記の教室割り当ての最適化を実現するには、授業が行われる全教室の空調設備の消費電力データが必要不可欠である。だが実際の空調設備の電力消費・挙動を調査しようにも、施設が古いことや危険性等の理由から、稼働中の実機を計測することができなかった。そこで、4号館4階の資料室（面積は16.5㎡、およそ10畳程度）に備え付けてあったパッケージ・エアコン（ダイキン 三相200V電源、2011年型、室内機FAP40BA、室外機RZZP40BBT）から冷房時・暖房時の電力消費モデルを求め、それを各教室に適用することで、各教室の空調設備の消費電力を推定することを試みる。エアコンの電力供給系統（分電盤）にクランプメータ（HIOKI クランプオンプローブ 9010-50）を取り付け、また、エアコン室内機の直下80cmほど下（およそ椅子に座っている人間の頭の高さ）に温度センサを設置した。そして、クランプメータと温度センサからの出力値を資料室内に設置したノートPCで自動計測するようにした。

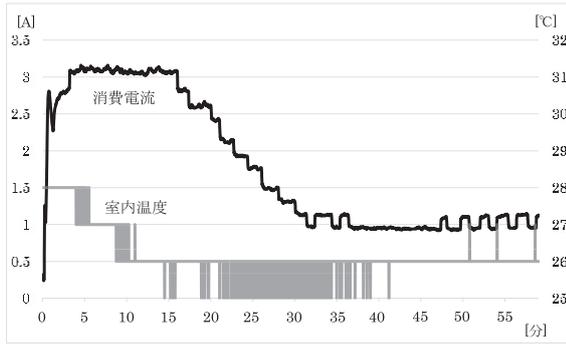


図3：冷房時室内温度と消費電流の推移
(風速設定：自動，室内初期温度：28℃、
設定温度：25℃)

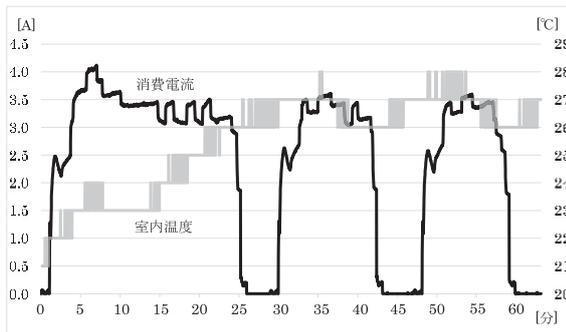


図4：暖房時室内温度と消費電流の推移 1
(風速設定：自動，室内初期温度：21
℃，設定温度：28℃)

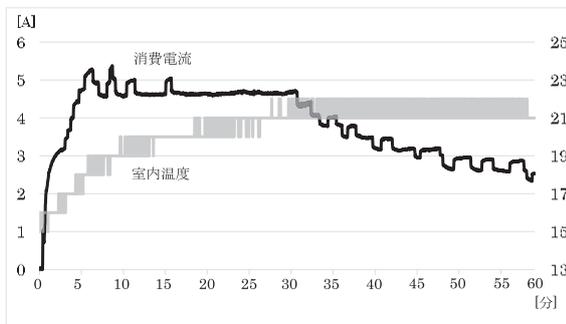


図5：暖房時室内温度と消費電流の推移 2

資料室内には実験機材と照明器具以外の熱源がない状態で実験を行った。部屋の外窓は既に板で遮光されていた。また廊下側にも窓があり光が入る状態であったため、廊下側に仕切り板を置き、直射日光が入らないようにした。

2.2. エアコン消費電力モデルの構築

前述のエアコンを実際に冷房・暖房動作させた時の室内温度および消費電流の推移を図3, 4, 5に示す。三相交流電力は $\sqrt{3} \times \text{電流} \times \text{電圧} \times \text{力率}$ で計算されるが、電圧は $200 \pm 5V$ 、力率は $0.9 \sim 1$ の間で変動していた。力率の変動はエアコンの構造・特性に関係すると考えられるが、運転状態との関係はほとんど不明瞭であった。以

表3：エアコンの消費電力モデル

設定	ハイパワー [kWh]	ローパワー [kWh]
冷房	0.6×資料室との面積比	0.2×資料室との面積比
暖房	0.7×資料室との面積比	0

後、電力または電力量を算出する場合、電圧=200V、力率=0.9と単純化する。

エアコン内部の制御系では設定温度と室内温度との比較を行い、室内温度と設定温度の差がある場合には定格運転（ハイパワー運転）を行っている。また、定格運転を行い室内温度が設定温度付近になると定格運転を止め低消費電力運転（ローパワー運転）へ切り替えていることが分かる。一般に、教室には定常的な熱源（人、照明など）が存在し、また外部からの流入熱量（日中等）または外部へ流出熱量（夜、低温等）が安定して存在する。そのため、冷房運転ではローパワー運転時とはいえ一定の消費電力を費やしているのに対して、暖房運転かつ外部からの熱の流入がある場合(図4)、ローパワー運転状態は周期的に変化しており、中程度に電力を消費する状態とほとんど電力を消費していない状態とを繰り返していることがわかる。一方、図5は夜かつ外気温が低い時の暖房運転実験結果であるが、熱量の流出が生じており、冷房時(図3)に類似した運転の挙動を示していると予想される。

我々は上記の実験結果をもとに、冷房時・暖房時それぞれのハイパワー・ローパワー運転消費電力モデルを作成し、表3の通りにまとめた。ここでハイパワーとローパワーの比率は様々な外的要因に左右される[4]。主な外的要因として、

- ・ 室外機ユニットの周囲の気温
- ・ 室内機、室外機ユニットのフィルターのホコリのたまり度合い
- ・ 風量の設定

などが挙げられるが、それらの影響を定量的に求めることは困難である。そこで表4に示す平年の気温データに基づいて、設定温度・運転モード、およびハイパワーとローパワーの比率を静的に算出した。資料室との面積比とは、モデルを適用する教室の面積を資料室の面積 (16.5 m²) で割ったものである。例えば面積比が10である場合、冷房使用時のハイパワー消費電力量は6.0 kWh、暖房使用時のハイパワー消費電力量は7.0 kWhとみなす。

2.3. 時間割編成システムの概要

時間割編成システムとは、本学科の画像メディア研

表4：福岡市の平均気温と月別授業回数、ハイパワー比率

期間	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
最高気温[°C]	9.9	11.1	14.4	19.5	23.7	26.9	30.9	32.1	28.3	23.4	17.8	12.6
平均気温[°C]	6.6	7.4	10.4	15.1	19.4	23.0	27.2	28.1	24.4	19.2	13.8	8.9
最低気温[°C]	3.5	4.1	6.7	11.2	15.6	19.9	24.3	25.0	21.3	15.4	10.2	5.6
授業回数	2	0	0	3	4	4	4	0	2	4	4	3
運転モード/Hi パワーの比率	暖房 /90%	-	-	-	-	冷房 /50%	冷房 /80%	-	冷房 /70%	-	暖房 /50%	暖房 /70%

研究室において2012~13年にかけて開発されたソフトウェア・システムである[5]。従来、時間割の編成は大学職員によって手作業で行われており、教員と連絡を取りつつ何度も重複や漏れがないかを確認する必要があった。そこで、

- ・ 科目・教員に変更があった場合にメールを用いて連絡
- ・ 科目が過不足なく登録されていることの確認
- ・ 講義担当教員の重複がないことの確認
- ・ 必修科目の重複がないことの確認
- ・ 教室の重複がないことの確認確認

の機能を提供し、またデータベースを使用したデータの一元管理が可能な、Webアプリケーション・システムが構築された。この時間割編成システムの処理の流れは大体に以下の通りである：

1. 開講科目情報を取得
2. 固定科目情報の入力
3. 理学部教員担当科目情報の入力
4. 工学部専門科目情報の入力
5. 科目登録、重複確認作業(修正時は4の工程に戻る)
6. 各学科が独自に定めた時間割を収集
7. 教室割作成
8. 教室重複確認作業(修正時は4の工程に戻る)

このシステムでは26のデータベーステーブルを用いており、csvファイルからデータベースへの情報のアップロード機能、編成した時間割のエクスポート機能も実装されている。開発言語はJavaである。またデータベースはPostgreSQLを用いる。

2.4. 教室割り当て最適化のアプローチ

各時限 ($T_k, k = 1 \dots K$) において各授業 C_i で登録されている人数 $C_i(n)$ が各教室 ($R_j, j = 1 \dots M$) の収容人数 $R_j(N)$ より少なくなるよう割り当てなければならない。

$$C_i(n) \leq R_j(N) \tag{1}$$

また、各時限にて1つの授業で使用される教室が重複してはならない。

$$C_i(n), R_j(N), T_k \neq C_s(n), R_s(N), T_k \tag{2}$$

$$k, s = 1 \dots I, (k \neq s)$$

既存の時間割編成システムでは、上記の制約下で割り当てを行っていた。本提案手法では、(1),(2)の条件を満たしつつ各授業において消費エネルギーが最小となるような、全ての $\{C_i(n), R_j(N), T_k\}$ を求める。

$$\min \sum_{j=1}^{j=M} Energy(C_i(n), R_j(N), T_k) \tag{3}$$

このとき、各教室の空調の消費エネルギーを $E_a(R_j)$ と表し、またエレベーター、廊下の照明といった各教室に属性として存在する教室外の消費エネルギーを $E_b(R_j)$ と表すことで、式(4)のように近似できる。

$$Energy(C_i(n), R_j(N), T_k) \cong E_a(R_j) + E_b(R_j) \tag{4}$$

2.5. 時間割編成システムの改良

上記で概説した教室割り当てアプローチをもとに時間割編成システムを改良する。まず、従来通り1~6の流れで授業時間割の編集を終える。ただし教室の選択に関して、実験教室やPC教室、また教員が使用教室を固定させたい授業が存在するという点を考慮する必要がある。次に、学生の履修登録が完了し、各授業の登録人数が決まったら、今回新たに追加した処理に進む。処理フローの概要は下記の通り：

1. 各時限において、全6学科の時間割から「授業リスト」を作成する。
2. 授業リスト内で、教室が指定されている授業が存在するならばそれらを取り出し、決定済みDBへ登録する。
3. 面積の小さい順(収容人数が小さい順)に教室を並べ、教室リストを作成する。
4. 決定済みDBに登録されている教室を「教室リスト」から除外する。
5. 「授業リスト」の先頭を参照する。その授業について、「教室リスト」において授業登録人数が教室定員以下である最初の教室を選択する。
6. 5.で選択された授業-教室組み合わせを決定済みDBに登録し、「授業リスト」「教室リスト」の先頭を



図 8：空調消費電力計算結果（提案手法の適用前）



図 9：提案手法を適用した場合での空調消費電力計算結果

除外する。

7. 授業リストが空になるまで，1～6の処理を繰り返す。

各時限において，上記の処理フローを実行する．全処理が完了したら，決定済みDBに登録されている各教室の消費電力量算出処理に移行する．まず，空調を運転かしないか，および空調の運転モードを決定する．次に，各教室とモデル教室との面積の比率から，教室を使用した場合の消費電力算出処理を，全授業に対して実行する．

図8は2014年度の時間割・教室割りをを用いた際の（提案手法適用前の）空調消費電力の計算結果出力画面である．工学部全体で420,000kWh消費するという見積もり結果が算出された．次に図9は本提案手法を適用した場合の見積もり結果である．工学部全体で310,000kWh消費するという見積もり結果が算出された．すなわち，本提案手法により27%の削減効果が見込まれるという結果が得られた．

2.6. パーティションを併用した場合の効果

前節では各教室の定員は不変であるという前提のもと，授業を行う教室割り当ての最適化手法を開発した．そこで，空気の流れを仕切るパーティションやエアーカーテン設備を教室に導入し併用した場合の効果についても調査する．全教室において，その定員を1/2にする位置で可動式パーティションを設置すると仮定する．また，そのパーティションを用いて教室を前方（教卓がある側）と後方とに分断する場合，教室の前方を使用し，後方は使用しないものと仮定する．ただし，前方と後方の空調システム・照明は分離されているものとし，前方と後方の間では空気の流出入が生じないものとする．

以上の仮定に基づき，時間割編成システムをさらに改良した．その結果，工学部全体で19,000kWhという見積もり結果が得られ，提案手法を何も適用しない場合と比較して55%の削減効果が見込まれるという結果が得られた．もっとも，空気・熱の出入りを完全に遮断できるよ

うな理想的なパーティションは存在せず，またパーティションの位置に合わせるように空調・照明を別系統化することも非常に困難である．しかし，前節の提案手法を適用してもなお，改善の余地があることを示している．

2.7. センサによる教員室・研究室空調の自動制御化の効果

本学工学部には，多数の研究室・教員室があり，また研究室を使用する学生・教員数にはばらつきが多く，10数人の定員を前提とした部屋を数人で使用していることも多い．そこで，特に教員室において，その部屋の利用者が個別に稼働させている空調設備をセンサにより自動制御化することで，空室状態での空調消し忘れを防止し，消費電力を削減できるのではないかと考えた．

まず外部からON/OFFを制御できるよう，空調制御パネルを改造した．次に，マイコンボード，ドアの開閉センサ（リードスイッチ），人感センサを設置した．マイコンボードはリードスイッチおよび人感センサからの情報をもとに，その部屋に人がいるかないかを判断する．一定時間（ t_{OFF} ）連続して，不在であると判断したとき，もし空調がONならばOFFにする．また，人物を検知した場合は直ちに，空調がOFFならばONにする．このような運転制御を「 t_{OFF} 間欠運転制御」と呼ぶこととする．

図11は午前10時半から午後8時半まで，冷房を連続運転させたときの消費電流の推移（一例）である．電源ON時の冷媒コンプレッサ始動および急冷動作によって生じる電力消費のピークが特徴的である．そして図12は，図11の冷房で $t_{OFF}=3$ 分と設定した場合で，14号館3階にある実際の教員室の教員在室記録を基づく消費電流シミュレーション結果である．空調がOFFになった場合，室内温度はシミュレーション開始時の温度にまで戻るものと仮定し，また外気温は不変であると仮定する．結果，消費電力を46%削減可能であると見積もられた．また同様の方法を暖房運転に適用した場合，26%削減可

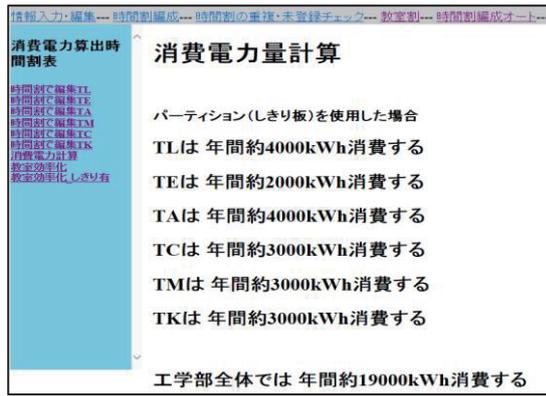


図 10 : パーティションを併用する場合での空調消費電力計算結果

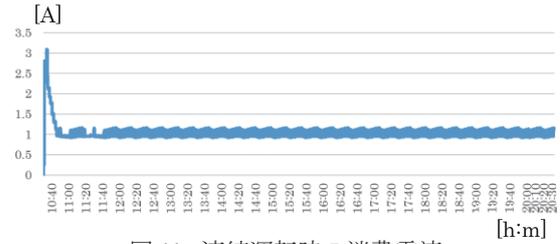


図 11 : 連続運転時の消費電流

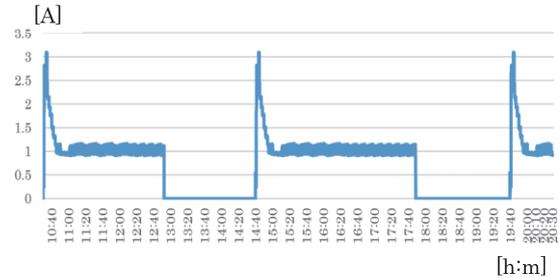


図 12 : 間欠運転時の消費電流
(t_{OFF} =3分でのシミュレーション)

能であると見積もられた。連続運転と間欠運転の有効性に関する議論[6]はあるものの、工学部の既存の校舎の場合、断熱性能がさほど良くなく、また各種の電気機器等が配置されている部屋が多いため、本手法は効果的であると考えられる。

3. おわりに

我々は福岡大学工学部で消費される電力のうち、教室、教員室、研究室等における空調の消費電力を削減するための3つの手法を提案し、調査を行った。その結果、大規模な設備改修を行うことなく現状の設備を活用しつつも、空調にかかる消費電力の削減が見込めることが分かった。

しかし指標モデルの構築では、重大な課題が残されたままである。既設の空調設備は今回指標モデルとして用いた小型パッケージ・エアコンに比べて旧型のもが多く、それらとの電力消費効率の比較は適切かどうか不明である。また、校舎によっては集中型の熱交換システムを導入しているところもある。より実態にあった指標モデルの構築、様々な構造の空調設備の調査が必要である。また今回は、教室内の熱源、外部との熱の流入・流出、および建物の蓄熱性を大幅に単純化して議論しており、今後の課題として残っている。

今回、すでに決定された時間割に基づき、授業登録人数を考慮して教室割の最適化を行った。だが、学生の教室間移動の距離・経路も考慮し、例えば、エレベーターをなるべく使用しないよう人の流れを形成する、あるいは移動人数ができるだけ減らす、といった観点も含めて最適化を行うことで、さらなる消費電力の削減が期待できる。また、本提案手法を工学部のみにとどめるのではなく、実際に本大学の全学部に適用すべく、積極的に取り組むべきであると考えられる。

参考文献

- [1] (財)日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット(編) : EDMC/エネルギー・経済統計要覧2007年版, (財)省エネルギーセンター, 2007.
- [2] 2015年度夏季の電力需給見通しについて, 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会電力需給検証小委員会第10回会合(資料4), 経済産業省, 2015.
- [3] 福岡大学の環境への取組み 環境報告書2015, 福岡大学 地球温暖化防止推進会議, 2016.
- [4] 上野 剛, 北原博幸 : 家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発 —その5 : 非定常状態への適用—, 電力中央研究所, 2014.
- [5] 石井利弥 : 福岡大学工学部時間割編成支援システムの実証実験と評価に関する研究, 福岡大学大学院工学研究科 修士学位論文, 2013.
- [6] エアコンの間欠運転と連続運転の節電効果比較, 電力中央研究所 システム技術研究所, 2011.