

クラスタ型エネルギーマネジメントに向けた 大学キャンパスのエネルギー計測システム

上吉悠人[†] 峰豪毅[†] 西宏章[†]

エネルギー資源の枯渇や地球温暖化などの環境問題に対して、日本では再生可能エネルギーの普及および民生部門での省エネ対策が強く求められ、これらを実現する次世代エネルギーシステムとしてクラスタ型エネルギーマネジメントシステム (CEMS) が注目され始めている。CEMS とは情報通信技術を用いて、複数の設備、建物、地域などを有機的に連携し、電力や熱エネルギーの需要と供給をリアルタイムで監視・調整し最適な需給の組み合わせを形成することで、高効率を実現するエネルギーマネジメントシステムである。本研究では、CEMS の実現に向けて、本研究室で提案する分散協調型デマンドサブライコントロールシステム KNIVES を用いて、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス (SFC) の電力エネルギー計測システムを構築した。さらに、本システムで取得した過去の電力消費量データをを用いて、電力の需要予測を行った。

Energy Measurement System in a University for Cluster Energy Management

Yuto Kamiyoshi[†] Gouki Mine[†] and Hiroaki Nishi[†]

To deal with environmental problems such as global warming and depletion of energy resources, energy conservation measures in the civilian sector and the spread of renewable energy are required strongly. As a next-generation energy system to achieve them, Cluster Energy Management System (CEMS) is beginning to be studied in Japan. CEMS is the energy management system, which cooperates with various dispersed power sources and buildings using information technology, monitors and adjusts energy supply and demand in real-time to form the best combination of them, and achieves high efficiency energy usage. In this study, the electricity energy measurement system using KNIVES (Keio University Network oriented Intelligent and Versatile Energy saving System) was build in Keio University Shonan Fujisawa Campus (SFC). In addition, it is declared that this system can predict power demand based on the data obtained before from itself.

1. 序論

現在、低炭素社会の実現のため、マイクログリッドなどの分散エネルギーネットワークシステムの研究が世界中で進んでいる。本研究ではその中でも、日本で今後の有効な省エネルギー技術として注目され始めているクラスタ型エネルギーマネジメントシステム (CEMS) の実現に向けた電力エネルギー計測システムの構築を目標とする。

CEMS とは情報通信技術を用いて、需要の特性や規模の異なる複数建物・施設を組み合わせて一つのクラスタをつくり、その中で電力や熱エネルギーの需要と供給をリアルタイムで監視・調整し最適な需給の組み合わせを形成することで、エネルギーの高効率を実現するエネルギーマネジメントシステムである。例えば供給側において、CEMS は対象地域内の複数のコージェネレーションシステム (CGS) などの分散電源の運転情報、電力や熱の需要などを一元管理し、これらに応じたダイナミックな運転制御を行う。対象地域内で、部分負荷運転をしているいくつかの CGS があつた場合、熱需要が大きい設備を定格運転させ、他は停止させるといった選択を行う。また供給情報を一元管理することで電力供給信頼度の向上、稼働率の低い発電設備の削減などの効果も望める。さらに、需要側では個々の建物に導入される BEMS (Building Energy Management System), HEMS (Home Energy Management System) などの連携を目標としている。BEMS はビルや工場などで既に実施されており、施設内の設備・機器の監視制御用ネットワークが広く使用され、日々のエネルギー消費データを自動的に集積、分析する。しかし、BEMS の制御方法は、季節別、時間帯別に代表的な運転パターンを予め用意するのが一般的であり、計測した設備や機器の情報から実時間で最適制御を行うアルゴリズムは利用されていない。HEMS は最も省エネルギー対策が遅れている一般家庭を対象に、情報家電によるエネルギー削減、各機器の電力使用量や使用パターンの表示による居住者に省エネルギー行動を誘発などが実施されている。またホームネットワークを利用して、居住者の行動学習による機器制御[1]、室内快適性を考慮した空調機制御、家庭用太陽光発電や CGS との連携などの研究が行われている[2]。CEMS はこのような BEMS や HEMS の情報を統合して地域全体の需要量を把握し、地域全体のエネルギーの効率的運用を可能にする。CEMS は日本の資源エネルギー庁の「省エネルギー技術戦略 2007」[3]の中で、省エネルギー型情報生活空間創生技術 (民生分野) の一つとして取り上げられているが、新しい概念であり、実環境では実施されていない。CEMS の実現に向けた課題としては以下のようなことが挙げられる。

- BEMS, HEMS 及び CGS などが有機的に連携する仕組みづくり
- 安定的かつ効率的にエネルギーを供給するため、変動する需要量や自然エネルギー発電量などの予測手法

[†] 慶應義塾大学大学院理工学研究科 {kamiyoshi, mine, west}@west.sd.keio.ac.jp

- 電力需給のリアルタイムの情報及び予測値を考慮した電力需給量の最適化手法
 - 一つの CEMS が対象とする複数建物を束ねたクラスタの決定方法
- よって本研究では、CEMS を具現化するための基礎研究としての位置づけで、民生用施設の一例として慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス (SFC) を対象としたエネルギー需給計測システムを構築する。大学施設は広大な敷地に様々な用途の建物群が存在し、それぞれ異なるエネルギー需要特性を持つ。また学科や学部、立地条件などによってもエネルギー需要特性は異なり、供給システムも複雑である。このため、大学キャンパスは CEMS のモデル地域として適しているといえる。また、日本では大学施設の省エネルギー対策は、一般の事務所建物などに比べて遅れているとされ、大学施設での省エネ対策の普及が求められている。本研究では当研究室で提案する分散協調型のデマンドコントロールシステム KNIVES (Keio Network oriented Intelligent and Versatile Energy saving System) を用いて、エネルギー需給計測システムを構築した。これにより、SFC の現状の電力エネルギーの需給状況の把握を可能にした。

2. KNIVES

民生部門における様々な規模の複数の需要家に対する地域ネットワークの形成、負荷平準化の実現、小型分散電源の連携、電量自由化への対応を可能にし、有効なエネルギーマネジメントを実現するために、分散協調型デマンドサプライコントロールシステム KNIVES (Keio university Network oriented Intelligent and Versatile Energy saving System) が提案された。KNIVES は主に以下のようなコンセプトを持つ。

- 発電量、消費電力、環境情報のリアルタイム計測データや需要家が有する機器の優先度を利用したデマンドサプライコントロール
- 複数の需要家の電力需要、分散電源の発電量を総合して管理する協調制御
- コジェネレーションシステムなどの分散電源の効率運用

2.1 KNIVES のシステム構成

KNIVES は図 1 のようにルートサーバ(Root Server)、広域サーバ・地域サーバ(Branch Server)、クライアント端末(Terminal)で構成されるツリー構造をしている。初期化サーバはサーバシステムのツリー構造の構成、管理を行う。サーバシステムにツリー構造を採用することで、エネルギーマネジメントを行う規模に合わせて適切な数、階層を用意でき、システムに拡張性を持たせている。また複数の末端サーバを用意することで単一サーバへの負荷集中を避け、サーバ間の総通信量の削減、ネットワークトラフィックの低減を図っている。これらにより、システム運用の安定性を確保している。サーバは下位サーバやクライアント端末から各需要家の消費電力、空調制御を行う室内の環境情報、制御状況などのデータを受信して管理する。クライアント端末は、需要家に設置され、消費電力・環境情報の測定を行い、サーバからの制御指示に従って

電気機器の制御を行う。これらのサーバとクライアント端末の通信により、分散協調型デマンドサプライコントロールを実現する。

サーバおよびクライアント端末との通信は TCP/IP を用いて、データの送受信を行う。サーバ間およびサーバクライアント間のメッセージ送受信には KNIVESML と呼ぶ XML ベースのマークアップ言語を用いる。また、各サーバはローカルに SQL データベースを持っており、データベースには下位サーバやクライアント端末から受信したデータや制御情報などが保存されており、通信時に保存や読み出しが行われる。

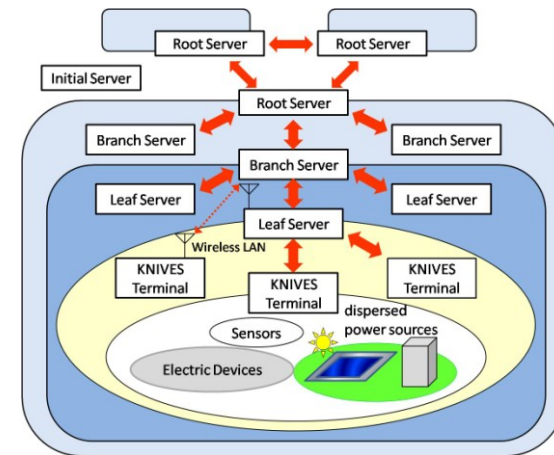


図 1 KNIVES のシステム構成

2.2 KNIVES 端末

クライアント端末はサーバから受信した制御情報に基づき、電気機器や分散電源の制御を行い、また自らが取得したクライアントのリアルタイム情報をサーバに送信する。クライアント端末の写真を図 2 に、クライアント端末の構成図を図 3 に示す。クライアント端末は Linux モジュールとコントロールモジュールから構成される。Linux モジュールは Atmark Techno 社の Armadillo-220 を採用した。Linux モジュールはインターネットを介した KNIVES サーバとの通信、サーバからの情報をもとに制御対象機器の制御スケジュールの決定、USART を介したコントロールモジュールとの通信を行う。コントロールモジュールは Atmel 社の AVR, Atmega645 やフォトモスリレー、端子台などで構成される。コントロールモジュールは Linux モジュールから送られる制御指令の受信、及びそれに基づいた電力消費危機の運転管理を行う。またセンサモジュールを用いた消費電力や環境情報(温度、湿度、照度、二酸化炭素濃度)の計測、及びそれらの Linux モジュールへの送信を行う。消費電力の測定は電力パルスセンサモジュールが行う。パルスセンサモジュールは電力計が消費電力に応じて発生させる

電力パルスを検知し、各需要家の消費電力を計測するモジュールである。KNIVES では、クランプ式 CT センサとパルス整形回路を用いた独自設計のモジュールを用いている。また、環境情報を取得することで、室内環境を考慮した空調制御を行う [4][5]。二酸化炭素濃度センサは、室内空気汚染室環境を測定し、換気を制御する他に、呼気に含まれる二酸化炭素より人数推定を行うことでエネルギー需要予測を行う [6]。

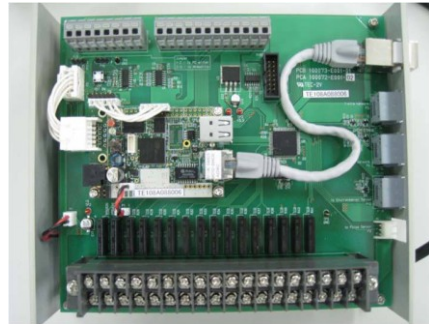


図 2 KNIVES 端末

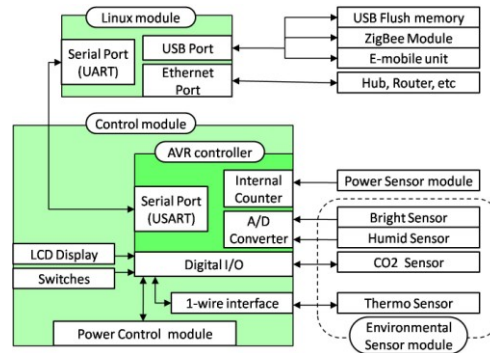


図 3 KNIVES 端末の構成

3. SFC におけるエネルギー計測システム

CEMS 導入に向けた実環境下での電力や熱エネルギーの需給計測システムを構築すれば、得られたデータからエネルギーマネジメント手法の検討が可能になる。そこで、本研究では、SFC における商用系統からの供給電力、CGS の電力と熱エネルギーの供給、各建物の電力需要などをリアルタイムで計測するシステムを構築した。

3.1 対象とする建物群

SFC は神奈川県藤沢市に位置し、1990 年に開設された郊外型キャンパスである。現在、約 5000 人の学生と 200 人の教職員が在籍している。本研究で消費電力測定対象とする建物の簡単な配置を図 4 に示す。本館は主に大学運営に関する各課の事務室などがある。厚生棟では生協購買部や食堂の営業が行われている。研究室棟・講義室棟 (A,B,C,D,E 館) はそれぞれ研究室棟と講義室棟が連結している 5 つの建物であり、それらは研究室群や 30 人程度収容の比較的小さい教室群からなる。メディアセンターでは、図書や電子ジャーナルなどの貸出・閲覧、館内設置コンピュータの利用ができる。体育館はアリーナ、剣道場、柔道場、フィットネスジムなどを含む施設である。大講義室棟 I および II には数百人収容可能な大講義室がある。Δ 館、大学院棟、Z 館は主に研究施設や講義室がある。湘南藤沢中部・高等部は隣接する中学校、高校である。

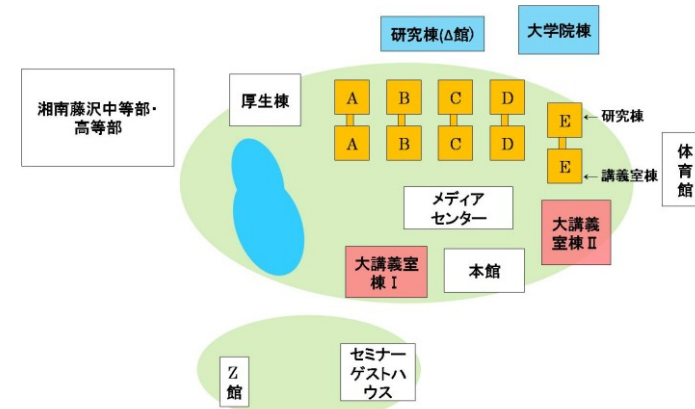


図 4 建物配置図

3.2 受電および発電設備

表 1 受電および発電設備

受電設備	電圧：6,600V，契約電力：2,200kW
ガスエンジン CGS (本館)	導入時期：2000 年 7 月
	容量：300kW × 2 台
	燃料消費量：73.6m ³ /h (都市ガス 13A) × 2 台
	発電効率 (HHV 基準/発電端)：0.32
	発電効率 (HHV 基準/送電端)：0.29 (冬期)，0.28 (夏期)
	6,600V - 37.9A × 2 台 -4P-50Hz-0.8Pf
熱交換機	温水供給熱量：633kW × 1 台，熱利用効率：0.34 (HHV 基準)
温水吸収式冷凍機	冷水供給熱量：422kW × 1 台，熱利用効率：0.22 (HHV 基準)

SFC の電力供給は、商用系統からの受電電力、本館地下に設置されているガスエンジンコージェネレーションの発電からなる。表 1 に SFC の受電および発電設備の概要を示す。ガスエンジンの排熱は夏期には温水吸収式冷凍機に投入され得られる冷水を冷房に利用している。冬期は熱交換機を介して得られる温水を暖房に利用している。この CGS の排熱利用により本館、大講義室棟 I および II、メディアセンター、厚生棟、研究室・講義室棟の空調エネルギーの一部を賅っている。

3.3 エネルギー計測システムの構成

本研究におけるエネルギー計測システム構成の概要を図 5 に示す。システム構成は主にサーバ、KNIVES クライアント端末 34 台からなる。各端末から得られたデータはサーバのデータベースに蓄えられる。KNIVES による電力測定箇所について、電力測定可能な既存のデマンドコントロール端末も併せて設置した。両端末の測定値を比較することにより、測定値の正当性を確認することが可能である。両端末はキャンパスネットワークの本実験用サブネットに接続され、それぞれにグローバル IP アドレスを割り振って管理している。これにより、学外サーバから個別端末にアクセスし、プログラムのアップデートなどが行えるので、メンテナンスが容易である。

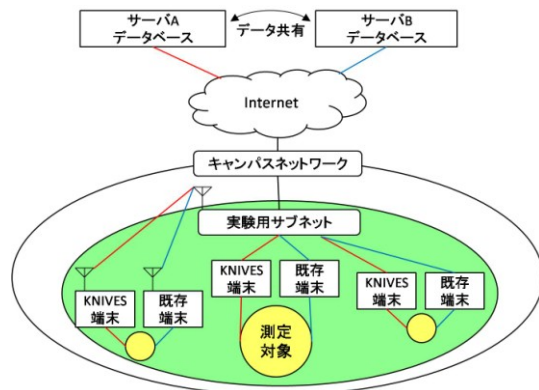


図 5 システム構成の概要図

3.4 測定項目の詳細

本エネルギー計測システムでは主に電力供給量、CGS による熱供給量、建物毎の電力消費量、一部の建物内での用途別電力消費量を測定する。測定する電力の SFC 電力システム内の位置づけを図 6 に示す。

まず電力供給量として受電電力および CGS の発電量を計測する。これら 2 つの合計電力により、SFC 全体の電力需要を賅っている。次に、CGS による熱供給量はガス使用量、熱源流量、熱源出入口温度、冷温水出入口温度、冷却水出入口温度を測定することで算出する。そして、建物毎の電力消費量については、SFC 全体の電力の受電・配電ポイントである本館地下 1F の受電室にある、受電室には図 7 のように各建物に配電するため、建物毎の変電装置（キュービクル）が設置されている。図 8 のようにキュービクル内から配線した電力パルス線にパルスセンサモジュールをクランプし、建物毎の消費電力を計測する。最後に、本館、研究棟・講義室棟、大学院棟では用途別に電力消費量を計測している。本館動力電力は本館の主に空調機やエレベーターなどの消費電力であり、本館電灯電力は本館のコンセントから利用される電力である。

研究棟・講義室棟では空調用電力の細やかな測定、およびシステムからの制御指令による単体空調機の制御を行えるため、研究棟・講義室棟 B, C, D の空調用電力を変電、配電するキュービクルから空調使用電力を測定する。一方で、各棟に設置されている単体空調機の使用電力測定、およびコンプレッサー制御による ON/OFF 制御を行う。さらに単体空調機制御が行われる教室では快適性を保つため、温度、湿度、二酸化炭素濃度、照度のセンシングも行う。大学院棟では低圧 CPU 盤、低圧動力盤、低圧電灯盤からそれぞれの用途の使用電力を測定する。

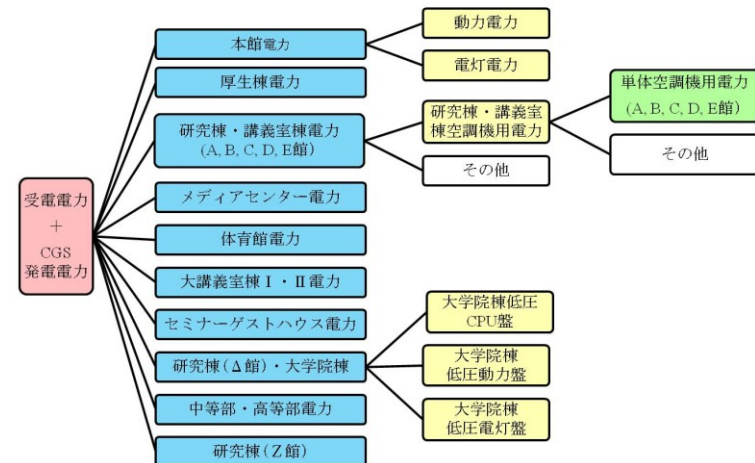


図 6 測定電力の構成図



図 7 受電室の様子



図 8 KNIVES の設置の様子

3.5 データ取得結果

本研究で構築したシステムによって、図 9 のように測定項目をリアルタイムで実験用サーバのデータベースに取得することが可能になった。取得データを分析して高効

率なエネルギーマネジメント手法を検討することや、履歴情報やリアルタイムデータを用いた制御を行うことが可能になった。図 10 は 2010 年 3 月 29 日の時刻毎の電力供給と建物毎の電力消費量である。これにより、SFC の電力需要は 8 時から急増し、13 時頃にピークを迎え、17 時以降に減少していくといった特徴を把握することができる。また、2 機の 300kw の CGS を同時に 8 時に稼働させ、20 時に停止しているため、20 時に受電電力が 600kw 分急増している。したがって、需要状況や CGS の熱利用状況を考慮して、稼働時間を動的に変更し、1 機ずつ個々に制御することでエネルギー利用効率を改善できると考えられる。

seq_no	date	id	ip	power
85784	2010-04-01 04:05:52	sfc0900	133.27.179.160	1.32
85783	2010-04-01 04:05:46	sfc0900	133.27.179.160	1.2
85782	2010-04-01 04:05:41	sfc0900	133.27.179.160	1.32
85781	2010-04-01 04:05:36	sfc0900	133.27.179.160	1.2
85780	2010-04-01 04:05:30	sfc0900	133.27.179.160	1.2
85779	2010-04-01 04:05:25	sfc0900	133.27.179.160	1.32
85778	2010-04-01 04:05:20	sfc0900	133.27.179.160	1.2
85777	2010-04-01 04:05:14	sfc0900	133.27.179.160	1.2
85776	2010-04-01 04:05:09	sfc0900	133.27.179.160	1.2
85775	2010-04-01 04:05:04	sfc0900	133.27.179.160	1.32

図 9 データベース

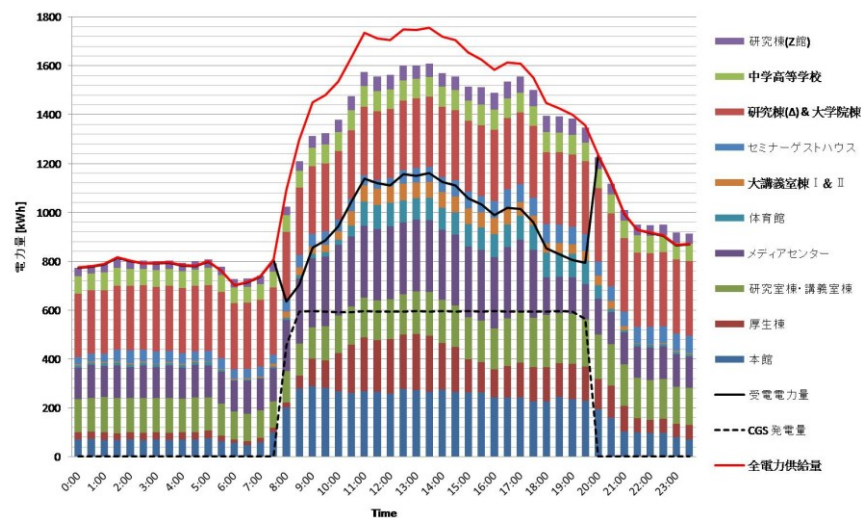


図 10 一日の電力需給の様子 (2010 年 3 月 29 日)

3.6 サーバ負荷

本実験で使用しているサーバは、プロセッサがIntel(R) Xeon(R) CPU L5520、メモリ搭載量は12GB、OSはCentOS 5.4を使用している。また、本実験においてサーバ上で動作するプログラムは主にkniservdとmysqldである。kniservdの基本システム構成を図 11 に示す。TCP Socket InterfacesはTCP/IPベースでサーバおよびKNIVES端末とのメッセージ送受信を行う。メッセージ送受信にはXMLベースのKNIVESMLを用いる。KNIVESMLで記述された受信パケットはKNIVES Paserによって構文解析され、KNIVES Structure ManagerとSQL Server Interfaceに引き渡される。KNIVES Structure ManagerはKNIVESサーバシステムのツリー構造を維持するためのデータベースで、上位サーバや下位サーバ、KNIVES端末のIPアドレスや各種設定情報を管理している。SQL Server Interfaceは各サーバのSQLデータベースとの通信を行うためのインターフェースである。KNIVES Script Processorでは取得した電力需給状況や目標値を元に、デマンド目標値の決定を行う。KNIVES Formatterでは送信用スクリプトをKNIVESMLで記述する。このデータは再度TCP Socket Interfacesを介し、宛先ノードへ送信される。以上の各モジュールはC言語により実装されている。本湘南藤沢キャンパスで構築したシステムにおけるkniservdのCPU使用率はおよそ0.4%であり、mysqldのCPU使用率はおよそ0.3%であった。従って、本実験システムのサーバへの負荷は少ないと言える。

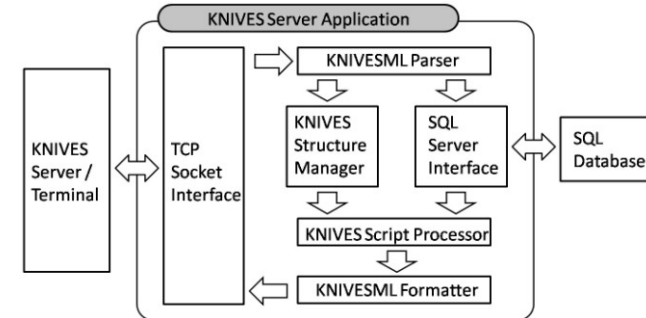


図 11 kniservd の構成

4. 履歴情報を利用した需要予測

CEMS において、分散電源や空調機などを制御して効率的なエネルギーマネジメントを達成するには、制御目標となる需要量予測が重要である。建物の電力需要量を決める主な要因として建物の利用状況と気温などの外部環境が考えられる。本論文で対象としている大学キャンパスは曜日などによって、授業時間割や利用時間が決ま

っている施設多く、そのような施設では曜日などによって電力需要量に再現性が見られる。また、一、二週間以内ならば気候の変動による電力需要量の変化の影響は比較的小さいと思われる。よって需要予測を行う日と関連のある過去の需要データを選び、30分毎に電力需要量の差分を取ることで各時刻の平均需要変動量を算出して、それを現在の測定値に足すことで次の時刻の需要量を予測した。

4.1 予測方法

- ① 予測日と似た電力需要を持つと思われる日を n 日分選び、 Δt 毎の電力消費履歴を取得する。 n 日目の時刻 t の電力消費履歴を $P_{his,n,t}$ と表す。本論文では日本の同時同量を考慮して Δt を 30 分とした。
- ② これら履歴データから、(1)式より予測される各時刻間の平均需要変動分 $\Delta \bar{P}_{his,t}$ を算出する。

$$\Delta \bar{P}_{his,t} = \sum_{k=1}^n (P_{his,k,t+\Delta t} - P_{his,k,t}) / n \quad (1)$$

- ③ 実際に制御を行う場合、稼働に時間を要する機器があり、必ずしもリアルタイムで制御を行うことができない。したがって、機器によってどれくらい先の需要予測が必要になるかが異なる。本論文ではまず 0 時から 24 時間先までの需要量を予測する場合は(2)式により各時刻の予測需要量 $D_{1,t}$ を算出した(手法1)。次に Δt 毎に次の需要量の予測を行う場合は(3)式により、予測需要量 $D_{2,t}$ を算出した(手法2)。

$$D_{1,t+\Delta t} = P_{mes,0} + \sum_{k=1}^t \Delta \bar{P}_{his,k} \quad (2) \quad D_{2,t+\Delta t} = P_{mes,t} + \Delta \bar{P}_{his,t} \quad (3)$$

4.2 予測結果

大学施設の多くの建物は、曜日などにより授業時間割や施設利用状況が決まっているため、曜日により電力需要量に再現性のある建物群と、曜日などによる再現性のないグループがあると考えられる。本論文では、再現性のあるグループの代表としてメディアセンターおよび研究棟・講義室棟、再現性のないグループの代表としてセミナーゲストハウス、さらに全建物の合計需要量について予測を行った。メディアセンターは平日か土曜か日曜・祝日かにより施設利用時刻が異なるため、予測を行う 2010 年 4 月 22 日木曜日の前の平日 3 日分をサンプルとして選んだ。研究棟・講義室棟は各曜日により異なる授業時間割なので、予測を行う 2010 年 4 月 22 日の 1 週間前と 2 週間前の同じ曜日の日をサンプルとして選んだ。セミナーゲストハウスの需要量は講演者の宿泊予定などによって変動し、曜日などには関係がないことが予想されるが、予測を行う 2010 年 4 月 22 日木曜日の前の平日 3 日分をサンプルとして選んだ。合計需要量は予測を行う 2010 年 4 月 22 日の 1 週間前と 2 週間前の同じ曜日の日をサンプルとして選んだ。表 2 に需要予測日、サンプル日、各時刻の実測値と予測値のデータ列の相関係数、各時刻の誤差の絶対値の平均を最小実測値で割った平均誤差率を示す。

また、それぞれの消費測定値と手法 1 と 2 による需要予測値を表した図を以下に示す。

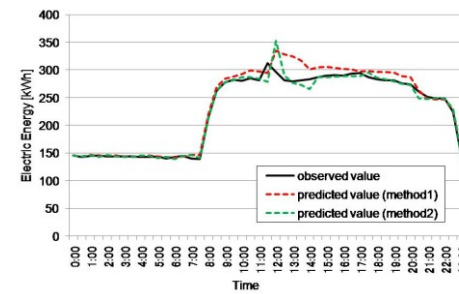


図 12 メディアセンター(2010/4/22, Thu)

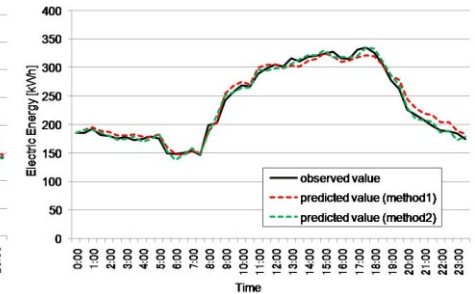


図 13 研究棟・講義室棟(2010/4/22, Thu)

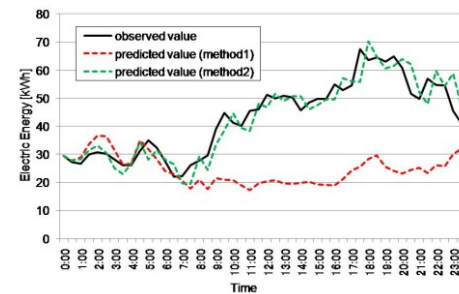


図 14 セミナーゲストハウス(2010/4/22, Thu)

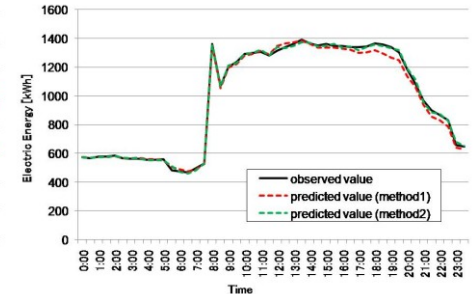


図 15 全需要量(2010/4/22, Thu)

まず、建物ごとの需要予測結果を見ると、曜日に基づくスケジュールにより再現性のあるグループと予想されるメディアセンターと研究室棟・講義室棟は本論文の予測手法により比較的精度のよい需要予測を行うことができた。一方、再現性のないグループと予想されるセミナーゲストハウスの需要予測は、やはり本論文の予測手法では困難であることがわかった。また、CEMSで制御を行う際、制御に必要な予測精度があり、システムへの負荷が少ない簡単な予測手法が望まれる。しかし、一般に予測精度と計算負荷はトレードオフの関係となる。本論文手法ではサンプル数 n が少なく、計算間隔 Δt が大きい方が簡単である。また、手法 2 のように Δt 毎に予測するのではなく、手法 1 のように 1 日などの長期予測の方が計算負荷は小さい。結果から、再現性のあるグループならば、適切なサンプル日を選ぶことで、サンプル数は 2,3 日分でもよいことがわかった。また、やはり手法 2 の方が予測精度は良いことがわかった。次に本論文の需要予測法では、再現性のないセミナーゲストハウスなどのグループの

予測は困難であったが、SFC 全体としての需要量は精度良く予測できた。この理由として、本論文で対象としている大学施設は再現性のある建物が多いということが挙げられるが、一般に再現性のないグループの建物でも複数軒を束ねて考えると、その合計需要量には曜日や気候などによりある程度の再現性が生じる。したがって、CEMS では、再現性のない建物が含まれていても、合計需要量の予測ができれば供給側を制御することでエネルギー効率の向上が可能になる。SFC の合計需要量予測の結果を見ると、今回の予測手法でもよい結果が得られたといえる。

表 2 需要予測結果

	予測日	サンプル日	予測手法	相関係数	平均誤差率
メディアセンター	2010/4/22 (Thu)	4/19~4/21 (Mon~Wed)	手法 1	0.9892	0.0705
			手法 2	0.9876	0.0349
研究棟・講義室棟 (A,B,C,D,E)	2010/4/22 (Thu)	4/8 and 4/15 (Thu)	手法 1	0.9927	0.0497
			手法 2	0.9953	0.0351
セミナーゲストハウス	2010/4/22 (Thu)	4/19~4/21 (Mon~Wed)	手法 1	-0.2328	0.8812
			手法 2	0.9386	0.1637
全建物合計 需要量	2010/4/22 (Thu)	4/8 and 4/15 (Thu)	手法 1	0.9981	0.0414
			手法 2	0.9995	0.0187

5. クラスターの構築法

第 4 章で述べた通り、キャンパス内には需要予測が容易な建物とそうでない建物が混在している。予測困難な建物についてはある程度の軒数を束ねる事で需要予測及び制御が可能であると結論付けた。実際に CEMS を構築する際にもこの性質を利用する事で需要予測や制御を行うが、どのような需要特性を持つ建物をどのように束ねるか、すなわちクラスタリング手法に関する検討が必要である。また、本論文ではキャンパスに構築した CEMS 内での需要予測について重点的に述べているが、実際には地域毎に複数の CEMS が存在すると考えられ、それらの境界問題、すなわちどの建物がどの CEMS に属するかを議論する事も必要である。例えば、エネルギー需要のうち熱需要が多くを占めるスポーツ施設や介護施設、電灯需要が多くを占めるオフィスや一般住宅、このように需要形態に偏りを持つ需要家群についてどのようにクラスタリングを行うかといった問題が該当する。このような観点からクラスタリング手法に関する議論は重要である。本章では最適化アプローチによる定量的なクラスタリング手法の提案を行う。

5.1 クラスターの数式表現

地域内に複数の CEMS と多数の建物が存在し、どの CEMS にどの建物を所属させるかという問題を考える。定量的なクラスタリングを行うためには問題の数式表記が必要であるため、(4)式のようにグルーピング行列を用いた行列表現を行う。ここで G は各 CEMS の消費電力量、 H は各建物の消費電力量、 X は CEMS と建物の所属関係を示すバイナリ行列である。第 4 章での考察の通り、各建物の電力使用形態は突発的な需要増減や四季の変化による需要増減などにより、常に変化してゆく。そのような変化に対応し、グルーピング行列も時と共に変化してゆくものとする。ただし次節に述べる提案手法の計算コスト等を考慮してリアルタイムとはせず、30 分毎や 1 日毎に再計算し、クラスタリングを行う事とする。

$$\begin{aligned}
 &(G_1(t) \cdots G_M(t)) = \\
 &(H_1(t) \cdots H_N(t)) \begin{pmatrix} X_{11} & \cdots & X_{M1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{1N} & \cdots & X_{MN} \end{pmatrix} \quad (4) \\
 &M : \text{Number of CEMS} \\
 &N : \text{Number of buildings}
 \end{aligned}$$

5.2 最適化アプローチ

SFC では 2 台のガスコジェネが設置されており、図 10 が示す様な一定運転を行っている。建物内に設置されたコジェネ等の電源を効率よく使用するためには需要側も一定負荷である事、すなわち電力使用量のばらつき度合いが少ない事が望ましい。この考えは SFC についてだけでなく一般に CEMS を構築する際にも重要である。

提案するクラスタリング手法では(5)式の様任意の目標値を設定し、実測値との二乗誤差について、30 分間に渡り積算した値を評価する。目標値としてはコジェネの運転計画に基づいた出力値やデマンド目標値などを設定する。制約式は(6)式で示すように、一つの建物は一つの CEMS にのみ所属するとした。この様な方法で(5)式を最小化するよう決定変数行列 X について最適化計算を行う。

図 16 は当研究室でデマンドコントロール及び消費電力量計測を行っている商用施設について、上記の手法を用いてクラスタリングのシミュレーションを行った時の結果である。7 件の需要家を 2 つのグループに分け、過去の電力消費データをもとに作成した 30 分毎のデマンド目標値に沿うようクラスタリングを行った。ここでは階段状に設定された目標値を満たすよう需要家の所属が時々刻々と変化しており、デマンド目標の達成に貢献している事から本手法は CEMS 内のデマンド計画の達成に有効と思われる。

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^M \sum_{t=0}^{30} (G_i(t) - G_i'(t))^2 \quad (5)$$

$$\text{subject to } \sum_{m=1}^M X_{nm} = 1 \quad \forall n \in N \quad (6)$$

G' : Target value of each CEMS
 X : Decision variables (Binary matrix)

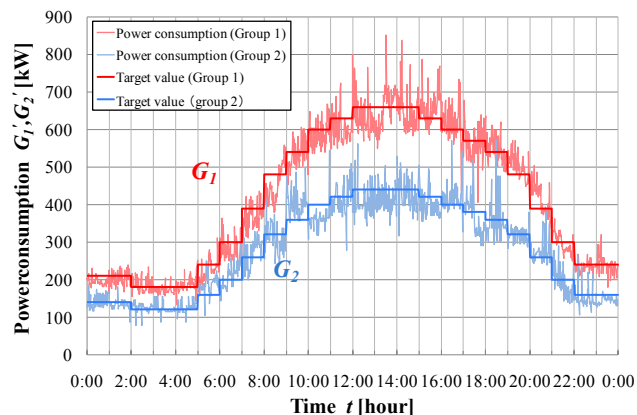


図 16 クラスタリングのシミュレーション

6. 結論

本論文では、まず今後普及が期待される CEMS を想定した大学キャンパス全体の電力エネルギー需給量のリアルタイム計測システムを構築した。このシステムにより、測定箇所のデータをリアルタイムで取得し、データベースで管理できることを確認した。次に、CEMS で制御を行う際に必要となる需要量予測を行った。これにより、大学キャンパス内の曜日により利用状況が決まっている建物では、予測を行う日と同じ曜日の最近のデータから各時刻の平均需要変動量を算出し、それを実測値に足していくことで需要予測ができることがわかった。また、曜日による再現性のない建物が含まれていても、SFC の合計需要量は曜日による再現性があり、同様の手法で需要予測が行えることが分かった。さらに、地域毎に複数の CEMS が存在する場合に、需要目標に応じて動的にクラスタリングを行う手法を提案した。

今後は予測精度と計算量のバランスを検討し、本システムに適する需要予測方法を

研究する。一方で、CGS の熱利用状況を分析し、供給側からのエネルギーマネジメント手法についても検討していく。これらにより、CEMS 運用アルゴリズムについての研究を行っていく。

謝辞 本研究を進めるにあたり、数多くのご助言、ご協力頂いた皆様に、謹んで感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 山崎達也, Jaewook Jung, Youngjae Kim, Minsoo Hahn, 豊村鉄男, Rui Teng, 丹康雄, 松山隆司: 家庭における電力センシングネットワークによるエネルギーマネジメント, 信学技報, EE2007-56, 2008.1.
- 2) Takekazu Kato, Hyun Sang Cho, Dongwook Lee, Tetsuo Toyomura, Tatsuya Yamazaki: Appliance Recognition from Electric Current Signals for Information-Energy Integrated Network in Home Environments. ICOST 2009: 150-157
- 3) 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課: 省エネルギー技術戦略 2007
- 4) T. Handa, A. Oda, T. Tachikawa, Y. Watanabe, J. Ichimura, H. Nishi, "Table-based scheduling method for distributed demand side management", *Industrial Electronics (IECON 2008)*, pp2748-2753
- 5) T. Handa, A. Oda, T. Tachikawa, J. Ichimura, Y. Watanabe, and H.Nishi. "Knives: A distributed demand side management system - integration with zigbee wireless sensor network and application" 6th International IEEE Conference on Industrial Informatics (INDIN 2008), pp. 324-329, Jul.200
- 6) 立川 智一, 西 宏章: 環境センサを利用した在室人数推定手法, 日本建築学会環境系論文集, 第 75 巻, 第 650 号, 2010 年 4 月 採録決定.