

## 電力ディスアグリゲーション技術の小規模店舗適用

尾崎 友哉<sup>1,a)</sup> 内田 尚和<sup>1</sup> 峰野 博史<sup>2</sup>

受付日 2016年2月28日, 採録日 2016年7月7日

**概要:** 改正省エネ法の施行や, 東日本大震災発生時の電力危機といった省エネへの意識の高まりから, Energy Management System (EMS) 市場が注目されている. EMS の主要な機能の1つとして電力見える化があり, 低コストで電力見える化を実現するための技術として, 分電盤1カ所で計測する電流波形から動作中の機器識別と消費電力推定を行う電力ディスアグリゲーション技術がある. 本研究では, 電力ディスアグリゲーション技術を用いた電力見える化システムを開発し, 小規模多店舗の代表例であるコンビニエンスストアで行った実証実験結果について述べる. その結果, 本システムに登録した代表的な動力系機器や電灯系機器の機器識別は約90%以上, 消費電力推定は平均絶対比率誤差 (MAPE) で約15%以下の精度で電力見える化を実現できることを確認した.

**キーワード:** EMS, 電力ディスアグリゲーション, 小規模店舗

## Electric Power Disaggregation System for Small Stores

TOMOCHIKA OZAKI<sup>1,a)</sup> NAOKAZU UCHIDA<sup>1</sup> HIROSHI MINEKO<sup>2</sup>

Received: February 28, 2016, Accepted: July 7, 2016

**Abstract:** Recently, Energy Management System (EMS) market has been increased because of demands for energy saving. One of the main function of EMS is “visualization”. Disaggregation technology, which enables to identify devices status by measuring one current at circuit breaker board, gathers attention for its low cost deployment. In this paper, we have developed an electric power disaggregation system for small stores and tested it at a convenience store. And the result shows the system can identify the device status in the store more the 90% accuracy and estimate electric power consumption of a device less than 15% MAPE for most device.

**Keywords:** energy management system, electric power disaggregation system, small store

## 1. はじめに

「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(以下, 省エネ法)は, 石油危機を契機として1979年に制定され, エネルギー消費量が大幅に増加している民生部門(業務部門と家庭部門)のエネルギー使用合理化を目的に改正が行われてきた. 2010年4月から施行された改正省エネ法[1]では, 工場・事業場単位のエネルギー管理から事業者全体でのエネルギー管理に規制体系が変わった. この改正により, 企業直営店に加え, チェーン展開している小口店舗も新たに

規制対象に加わった. 規制対象となる企業では, 全事業所で使用している電力量を把握したり, 消費電力のピークを抑えたりするなどの省エネ対策が急務となっており, 多拠点向け遠隔管理システム市場, 診断・コンサル市場が急拡大している[2].

省エネ対策には消費電力の見える化が有効な手段であり, 電力見える化を行うシステムとして Energy Management System (EMS) がある. 従来の EMS で詳細な見える化を行うためには, 見える化を行う箇所・電気機器(以下, 機器)の数だけ計測用センサを取り付ける必要があり, 計測箇所に比例して導入コストが上昇するという課題があった. この課題を解決する技術として, 電力ディスアグリゲーション技術[3]が注目されている. 電力ディスアグリゲーション技術とは, 分電盤1カ所で計測する電流波形から動作中

<sup>1</sup> 株式会社日立製作所  
Hitachi Ltd., Yokohama, Kanagawa 244-0817, Japan

<sup>2</sup> 静岡大学  
Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan

a) tomochika.ozaki.wr@hitachi.com

の機器識別と消費電力推定を実現する技術である。この電力ディスアグリゲーション技術を用いることで、測定対象の機器ごとに計測用センサを設置する必要がなくなり、計測用センサ数の削減や、設置の手間を省くことで導入コストを削減できる。

本研究では、この電力ディスアグリゲーション技術を用いた電力見える化システムを開発し、小規模多店舗の代表例であるコンビニエンスストアで行った実証実験結果について述べる。

## 2. 小規模多店舗向け電力見える化システムの要件

電力ディスアグリゲーション技術の概要を図1に示す。電力ディスアグリゲーション技術では、分電盤の主幹に設置した電流センサで、家庭内や店舗内にある動作中の機器識別や消費電力推定を行う。その際、あらかじめ機器の特徴データを登録あるいは学習させておき、分電盤での計測データと登録した特徴データとの関係から、動作している機器の推定を行う。

電力ディスアグリゲーション技術を用いた小規模多店舗向け電力見える化システムの要件を以下に示す。

### (1) 電力の見える化ができること

機器のON/OFF状態・消費電力の可視化を実現し、いつどの機器がどのくらい電力を消費したかを把握可能にすることで節電に役立てられる。さらに、リアルタイムでの消費電力可視化により、契約電力量に達しそうなときに機器の消費電力を抑えるなど、消費電力ピークカット制御に役立てられる。電気機器のON/OFF状態・消費電力の可視化を実現するためには、様々な機器の成分が混在する分電盤で計測した電流から、動作している個々の機器を識別するとともに、識別した機器の消費電力を推定できる必要がある。

### (2) 多店舗への展開が容易であること

小規模多店舗向けには、低コストで多店舗に導入できるだけでなく、1つの店舗に導入したシステムを他店舗へも容易に展開できることが重要となる。電力ディスアグリゲーション技術では、あらかじめ機器情報の登録が必要となる。多店舗展開を行っているケースでは、各店舗で同じ機器を導入していることが多いため、1度登録したデータを再利用できることが重要となる。また、すべての機器を

登録することは困難であるため、未登録機器があっても影響を受けず動作する必要がある。

## 3. 電力ディスアグリゲーション技術

電力ディスアグリゲーション技術は、大きく分けて、オフラインデータ分析方式とリアルタイム方式の2種類がある。

オフラインデータ分析方式として、HMM (Hidden Markov Model) を用いる方式 [4], Sparse Coding を用いる方式 [5], 各機器の消費電力変化量の分布を用いる方式 [6] などが提案されている。オフラインデータ分析方式は、収集したデータを後から分析することを想定しており、スマートメータなど比較的サンプリング間隔が長い電力情報の変化から、各機器の状態や消費電力を推定する。しかしながら、リアルタイムでの可視化が難しいため、ピークカット制御には適さないという課題がある。

一方、リアルタイム方式では、細かなサンプリングで電流波形解析を行い、リアルタイムで機器状態を推定する。リアルタイム方式として、ニューラルネットワークを用いる方式 (以下、NN方式 [7]), 基準電流波形を用いる方式 (以下、基準電流波形方式 [8]), ウェーブレット変換 [9] を用いる方式 (以下、ウェーブレット変換方式 [10]), EMI (Electromagnetic Interference) を利用する方式 (以下、EMI方式 [11]) などが提案されている。表1に、これらリアルタイム方式の小規模多店舗向け要件への対応状況を示す。

NN方式は、電流波形の高調波スペクトルを入力とし、動作中の機器識別と消費電力の推定にNNを用いる。しかし、複数の機器が同時に稼働している状況では、すべての組合せで電流波形を学習しなければならず、学習に時間を要するという課題がある。また、店舗ごとに学習が必要となるため、多店舗への導入には適さない。5種類の機器が存在する基礎実験で、機器の状態推定精度96%、消費電力推定40%~100%の精度であったと報告されている。

基準電流波形方式は、各機器の基準となる電流波形をあ

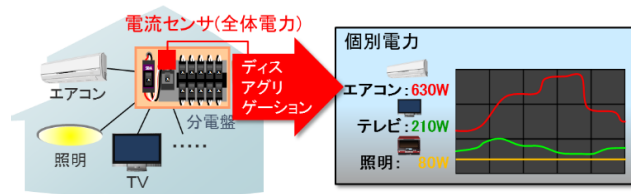


図1 電力ディスアグリゲーションの概要

Fig. 1 Overview of electric power disaggregation.

表1 電力ディスアグリゲーション方式の比較 (リアルタイム方式)  
Table 1 Comparison of real-time electric power disaggregation methods.

	見える化		多店舗展開	
	機器識別	電力推定	機器情報の再利用	未登録機器対応
NN	○	○	×	×
基準電流波形	○	○	○	×
ウェーブレット変換	○	×	○	○
EMI時間変化	○	×	○	○
提案方式	○	○	○	○

らかじめ登録し、そこから複数の機器が動作した状態の電流波形を合成できるようにする。そして、分電盤で観測された電流波形と差が最も小さくなる合成パターンを探すことで機器の状態や消費電力を推定する。基準電流波形は機器のみに依存するため、他の店舗でも利用可能であると考えられる。しかし、未登録の機器がある場合、合成パターンとの計測電流パターンの乖離が大きくなるため、精度が悪化する。

ウェーブレット変換方式は、各機器の電流波形からウェーブレット変換により特徴データを抽出して登録し、分電盤で計測された電流波形から登録された特徴データを探し出すことで、動作している機器を識別する。ウェーブレット変換方式では、4種類の機器が存在する実験環境において、各機器の動作状態を95%以上の精度で推定できたと報告されている。ウェーブレット変換方式で使用する特徴データは、原理的に機器のみに依存するため、他の店舗でも利用可能と考える。また、未登録の機器がある場合の動作については報告されていないが、計測された電流波形に、登録された機器の特徴データが存在するか否かで判断するため、未登録の機器があっても動作すると予想される。しかしながら、ウェーブレット変換方式では、動作中の機器の状態推定のみが報告されており、消費電力の推定については報告されていない。

EMI方式は、EMIの時間変化を分析し、機器のON/OFF状態、および、機器の動作モードを推定する。壁のコンセントで電力波形に現れるEMIノイズを観測するため、分電盤にクランプ型電流センサ(CT)を設置する必要がなく、設置が簡単であるという利点がある。また、ウェーブレット変換方式と同様に、特徴データは、原理的に機器のみに依存するため、他の店舗でも活用可能と考える。しかしながら、消費電力の推定はできない、500kHzでサンプリングが必要であるためシステムのコストが高くなるという課題がある。16種類の機器を使用している環境において、状態の検出精度81.5%~100%であった報告されている。

本研究では、リアルタイムでの電力見える化が可能であり、また、原理的に多店舗への展開が容易と思われるウェーブレット変換方式を採用し、従来から可能であった機器の状態の推定に加えて、ウェーブレット変換を用いた消費電力の推定方式を提案する。そして、提案方式を採用したシステムを開発し、コンビニエンスストアで実証実験を通してその有用性を確認する。

#### 4. 小規模店舗向けディスプレイアグリゲーションシステム

##### 4.1 ウェーブレット変換を用いた推定原理

一般的に、各機器は、それぞれ特徴的な消費電流波形を有する。消費電流波形の特徴は、波形の形状(周波数分布)とその時間変化を同時に解析できるウェーブレット変換を

行うことで、展開係数となって現れる。図2に照明およびエアコンの電流波形とウェーブレット変換後の展開係数の一例を示す。また、電気回路の性質により、複数の電気機器が同時に動いたときの電流波形は、それぞれの電流波形の和になる。統合された電流波形をウェーブレット変換すると、各機器の特徴を表す展開係数も和となって現れる。同じく、図2に照明+エアコンの電流波形とウェーブレット変換後の展開係数の例を示す。統合された電流波形の展開係数においても、照明、エアコンそれぞれの特徴が確認できる。この原理を利用し、分電盤で計測した電流波形をウェーブレット変換した展開係数と、各機器の特徴を表す展開係数とを比較することで、動作している機器を特定する。また、ウェーブレット変換を行った後の展開係数は、元の波形の振幅と比例することが知られている[9]。図3にエアコンの電流の増加にともなう展開係数の変化の例を示す。この性質を利用し、展開係数の大きさから電力を推定する。

以下、提案する方式の詳細について説明する。

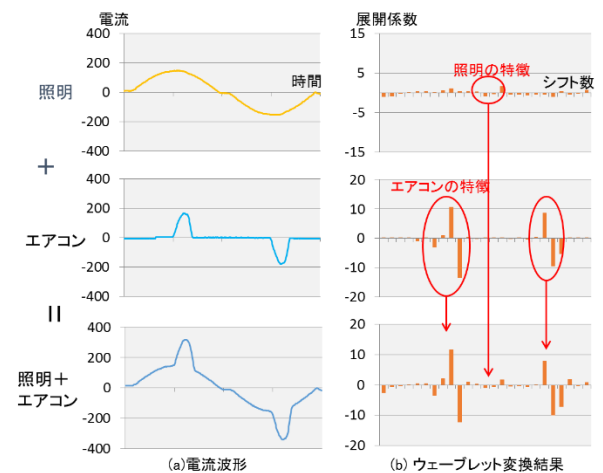


図2 機器推定の原理

Fig. 2 Basic mechanism to identify devices.

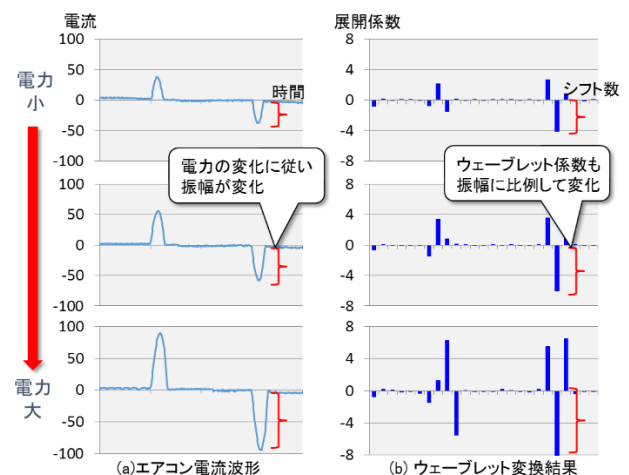


図3 電力推定の原理

Fig. 3 Basic mechanism to estimate power usage.

4.2 機器情報の登録と推定

4.2.1 機器情報の登録

提案方式では、まず、機器の状態と消費電力の推定を行うための機器情報を登録する。登録する機器情報を表 2 に示す。多くの展開係数を用いてマッチングを行うとより正確になると予想されるが、計算コストの増大を招く。そこで、まずは基礎評価として、1つの展開係数だけを用いて機器の動作状態と電力の推定を行う方式を採用することとした。

(1) 機器の特徴データの登録

登録する機器の交流 1 周期分の電流波形を計測し、式 (1) を用いて、計測したデータをウェーブレット変換して展開係数  $w_k^{(4)}$  を抽出する。

$$w_k^{(4)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\overline{\psi_{4,k}(t)}dt \quad (1)$$

ここで、 $f(t)$  は信号、 $\psi_{4,k}(t)$  はマザーウェーブレット、 $k$  はシフト数である。また、4 はウェーブレット変換のレベルである。レベルが低いと係数の値が小さくなりノイズ成分の影響を受けやすくなる。反対にレベルが高いと時間分解能が低くなり他の波形との判別が難しくなる。今回は事前に複数のレベルで試した結果、レベル 4 の係数を採用することにした。

提案方式では、ウェーブレット変換後に機器の特徴を表す適切なシフト数  $k$  を Dwt Coefficient Number として登録する。推定時に計測した電流波形から得られたシフト数  $k$  の展開係数の値が Threshold 以上であった場合に、その機器が動作していると認識できるように Threshold を設定する。

(2) 電力推定係数の登録

ウェーブレット変換の展開係数が元の波形の振幅に比例する性質を利用し、電力変動にも対応可能な電力推定として、下記の式を用いて電力を推定する方式を提案する。

$$Power = Power\ base + Dwt\ coefficient \times Power\ usage\ coefficient \quad (2)$$

ここで、*Dwt coefficient* は Dwt Coefficient Number が示すシフト数  $k$  に対応する展開係数の値、*Power usage coefficient* と *Power base* は、電力を算出するための係数である。*Power base* はその機器の最低電力に相当する値であり、*Power usage coefficient* と *Power base* の値は、実際の電力計測の結果と照らし合わせて決定する。

表 2 機器情報  
Table 2 Device information.

Item	内容
Device Name	機器の名称
Dwt Coefficient Number	展開係数のシフト数 $k$
Threshold	動作状態の判断基準
Power Usage Coefficient	消費電力推定のための係数
Power Base	

4.2.2 機器の状態と電力の推定

機器の状態の推定と電力の推定は、以下の手順で行う。

(1) 電流波形計測

時刻  $t$  での交流 1 周期分の電流波形を計測する。計測した電流波形をウェーブレット変換し、展開係数  $w_k^{(4)}$  を抽出する。

(2) 機器の特定

(1) で得られた展開係数  $w_k^{(4)}$  から、機器情報の Dwt Coefficient Number に登録されたシフト数  $k$  の展開係数を取得する。取得した展開係数の値が登録されている Threshold 以上であれば、当該機器が動作中と判断する。この処理をすべての機器情報に関して行う。

(3) 電力の算出

機器が動作中と判断した場合、計測データから得られたシフト数  $k$  の展開係数と、機器情報の *Power usage* と *Power base* を用いて、式 (2) により消費電力を推定する。

4.3 小規模店舗向けシステムの構成

今回開発したシステムの構成を図 4 に示す。今回開発したシステムは、計測装置、データ解析装置で構成し、計測装置とデータ解析装置は LAN で接続される。計測装置は分電盤の近くに設置して電流を計測し、データ解析装置に計測したデータを送信する。データ解析装置では、提案手法に基づいて機器の状態と消費電力の推定を行う。

(1) 計測装置

計測装置では、分電盤主幹に取り付けたクランプ型電流センサ (CT) で、店全体の電流波形を計測する。計測装置のブロック構成を図 5 に、スペックを表 3 に示す。図中の左から、電流・電圧それぞれを計測するセンサ、電流センサの出力を AD コンバータに入力するための回路と電圧ゼロクロスを検出するための回路、電流をサンプリングする AD コンバータで構成し、CPU によりサンプリングした電流値を取得する。取得した電流値は、ネットワーク I/F を通じてデータ解析装置に送信される。

電力見える化には厳しいリアルタイム性は要求されないため、計測間隔は 30 秒としている。また、AD コンバータについては、一般的に入手が容易なサンプリングレート

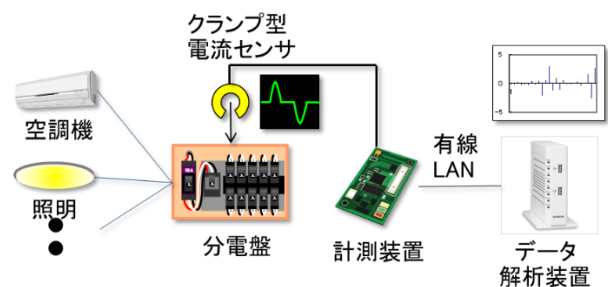


図 4 システム構成図  
Fig. 4 System block diagram.

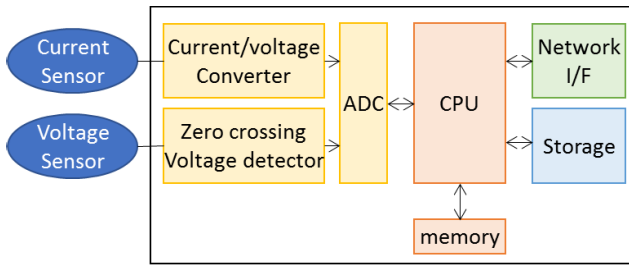


図 5 計測装置のブロック構成図  
Fig. 5 Block diagram of measuring part.

表 3 計測装置のスペック

Table 3 Specification of measuring part.

NO.	Item	Description
1	CPU	SH2A, 192MHz
2	RAM	32MB
3	ADC	12bit x 8ch
4	LAN	100BaseT
5	RTC	Battery Backup

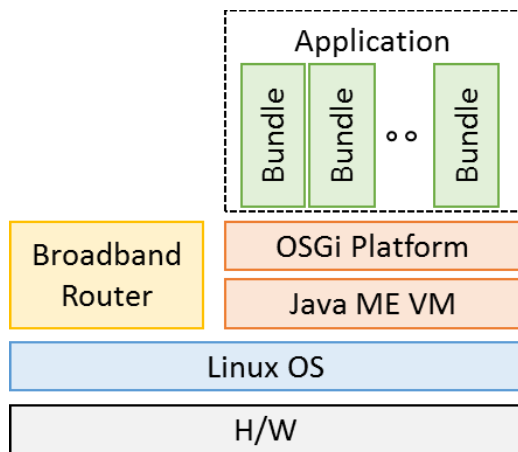


図 6 EMS コントローラ試作機のソフトウェア構成  
Fig. 6 Software structure of EMS controller.

表 4 EMS コントローラ試作機のスペック

Table 4 Specification of EMS controller.

NO.	Item	Description
1	CPU	ARM11, 650MHz
2	RAM	512MB
3	OS	Linux
4	Framework	Java + OSGi

20 kHz, 量子化ビット 12 bit のものを用いた。さらに, 計測時刻を記録するために RTC (Real Time Clock) を搭載した。

(2) データ解析装置

データ解析装置のブロック構成を図 6 に, スペックを表 4 に示す。データ解析装置には, 消費電力を表示するための GUI を有する EMS コントローラの試作機を利用した。OS には Linux™ を使用しており, その上に, Java™

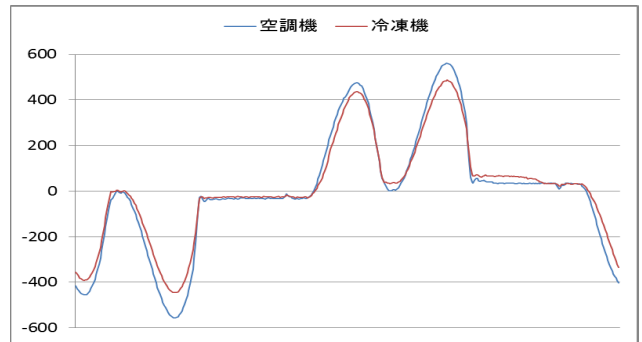


図 7 同一電力時の空調機と冷凍機の電流波形比較

Fig. 7 Comparison of the current wave form between an air-conditioner and a chilling unit.

VM と OSGi™ [12] フレームワークを搭載している。各種アプリケーションは OSGi プラットフォーム上でバンドルとして動作する。データ分析機能も OSGi 上のアプリケーションの 1 つとして開発した。

4.4 類似機器の消費電力の分離機能

図 7 に示すように, 空調機と冷凍機など, 同じようなインバータ回路で駆動する機器の電流波形はきわめて近い形状となる。そのため, それぞれの機器の展開係数は非常に似通った値となり, そのままでは区別することが困難である。コンビニエンスストアでは, 空調機と冷凍機が同時に導入されるケースが多いため, ここでは, これらの消費電力の分離方法について検討する。

空調機と冷凍機の電力波形, 時間的な変化などを詳細に分析すると, 高周波成分 [13], 電力の時間的な変化に特徴があらわれる。たとえば, 96 kHz でサンプリングを行うと, 10 kHz~48 kHz の成分に空調と冷凍機で異なる特徴が確認できる。しかしながら, 高周波でサンプリングするためには高精度の AD コンバータが必要になること, データ量が増大することなどから, 低コスト化を目指す本システムでの採用は難しいと判断し, 電力の時間的な変化に着目することにした。

空調機と冷凍機それぞれの 1 日分の電力データを用いて, 30 秒ごとの電力の変化量 ( $\Delta p$ ) を算出し,  $\Delta p$  の大きさを 5 W 単位で集計してヒストグラムを作成した。結果を図 8 に示す。空調機に関しては  $\Delta p$  が 40 W 未満の場合が多く, 反対に冷凍機に関しては 40 W 以上が多いことが分かる。このことから,  $\Delta p$  が 40 W 未満の場合は空調の電力変化, 40 W 以上の場合は冷凍機の変化と見なし, 全体の電力からそれぞれの電力を分離することにした。ただし, 単純に 40 W を閾値とした場合, 片方の機器に多く加算されてしまうという問題が発生する。そこで, 1 日の始まりと終わりでは消費電力がほぼ同じとなる傾向に着目し, 空調機分, 冷凍機分それぞれの変化量の積分値がほぼ 0 となるように閾値を調整した。図 9 に分離処理の処理フローを示す。

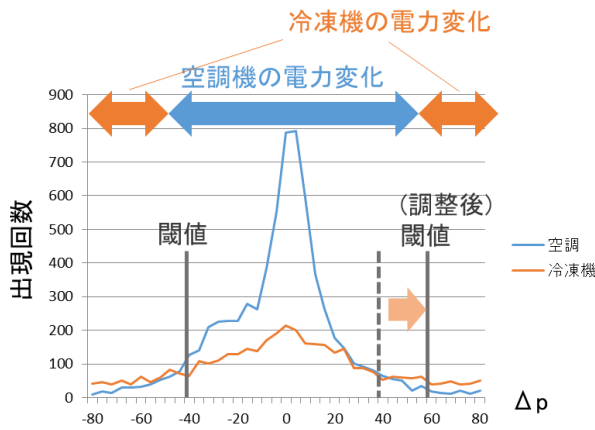


図 8 電力の変化量 ( $\Delta p$ ) と閾値の調整

Fig. 8 Variation of power change

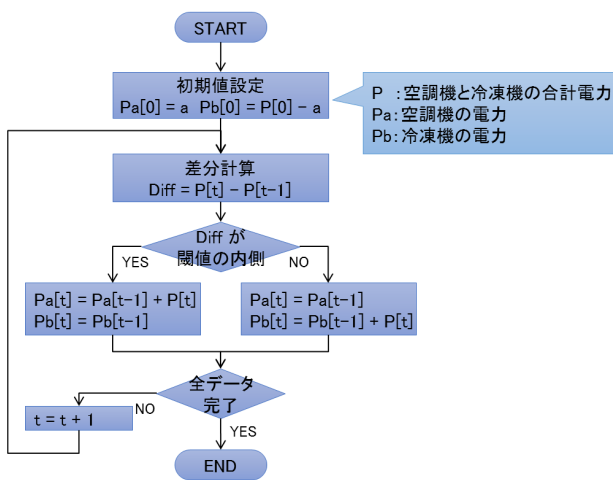


図 9 成分分離の処理フロー

Fig. 9 Flow chart to separate the power usage of air-conditioner and chilling unit.

## 5. 実証実験

### 5.1 実証実験の目的

今回の実証実験では、多数の機器が動作している実際の店舗環境で、提案手法により、特定の機器の状態および消費電力推定が行えることを確認する。

### 5.2 実験の概要

今回、実証実験を行った店舗は、床面積は約 200m<sup>2</sup>、24 時間営業のコンビニエンスストアである。一般のコンビニエンスストアに比較すると大がかりな調理設備を持ち、パン、弁当の製造・販売を行っているのが特徴である。実験店舗には、動力系と電灯系の 2 つの電力系統があり、それぞれ表 5 に示す機器が接続されている。

今回開発したシステムを上記店舗に設置した (図 10)。電力系、電灯系それぞれにディスアグリゲーションを行うための CT を設置し、さらに、推定精度の評価を行う際の正解となる実測電力を計測するための CT を複数設置した。

表 5 設置機器

Table 5 Devices in the store.

電力系統	接続機器
動力系機器	空調機 4 台, 冷凍機 4 台, フライヤー, ドリンクケース, オープン, IH ジャー
電灯系機器	照明(店舗内, 店舗外), 電子レンジ, 換気扇, ショーケース, 缶ウオーマ, POS, トイレ

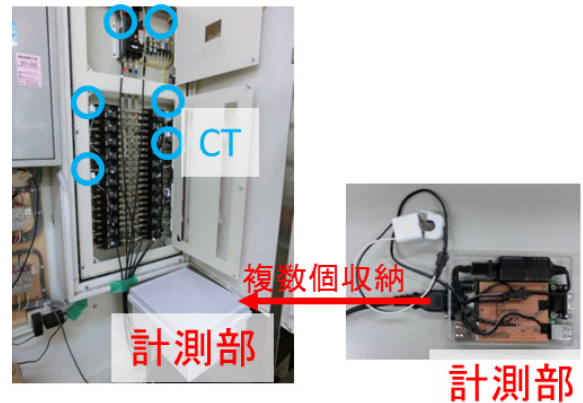


図 10 設置の様子

Fig. 10 Deployment of the system.

実証実験は、夏季 (6 月~7 月) に、事前調査、機器情報の登録、状態および消費電力推定の評価を、それぞれ 1 日実施した (合計 3 日)。

### 5.3 事前調査

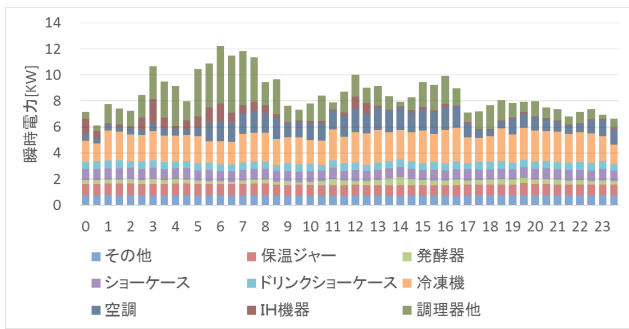
事前調査として、実験店舗における 1 日の消費電力を調査した。結果を図 11 に示す。この調査の結果から、以下のことが判明した。

#### (1) 電力系

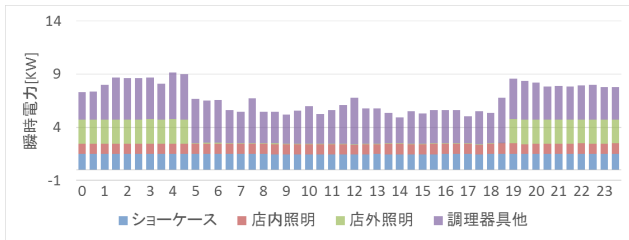
- 3kW (全体の 2~4 割) 程度は、常時一定電力で稼働している機器が占める。
- 空調の電力の占める割合は、出力が上がる午後の時間帯で 2 割程度。
- 電力消費ピークは朝方で、IH 機器やオープンの稼働が主な要因と推測される。

#### (2) 電灯系

- 夜間の電力の 1/3 は店外照明 (看板照明, 駐車場照明用水銀灯)。
- 日中は約半分の電力をデリカ・ベイク関連 (弁当用ショーケース, 電子レンジ, 調理作業用など) が占める。
- 店内照明の占める割合は、日中の電力 17%, 夜間の電力の 14%
- ショーケースは非インバータ型で 1 日を通してほぼ一定出力  
一定の電力を消費することが分かっている機器に関し



(a) 動力系の消費電力



(b) 電灯系の消費電力

図 11 事前調査結果

Fig. 11 Result of power usage in one day.

ては、リアルタイムで変化を把握する必要が小さい。また、ヒータなど線形負荷の調理機器は消費電力が大きいが、ウェーブレット変換を行った際に特徴が現れないため、推定対象からは除外した。よって、本システムによる推定対象として、変化の大きな機器である空調機、冷凍機、看板照明（以下、照明）に加え、比較的消費電力の大きいIH機器と電子レンジを選択し、機器情報を登録することにした。推定対象とした機器以外の機器については機器情報を登録しない。

#### 5.4 推定原理の動作確認

空調機、冷凍機、照明、IH機器、電子レンジの機器情報の登録について説明する。空調機と冷凍機の電流波形の特徴がほぼ一致しており、両者の区別をすることが困難なため、空調機と冷凍機の合計電力の推定するように機器情報を登録している。

今回の実証実験では、各機器に関して、表 2 に示した機器情報を以下の手順で求めた。

- ① 機器個別の電流波形の展開係数を求め、値が大きい展開係数のシフト数を候補として複数選択
- ② 分電盤で計測した電流波形の展開係数のうち、①で候補としたシフト数の展開係数の1日分の変動を求める。同時に、当該機器の同日の電力変動を求め、展開係数の変動と比較する。最も相関が高い展開係数のシフト数を Dwt Coefficient Number として登録
- ③ ②で選択したシフト数の展開係数の最小値 × 80%の値を Threshold として登録
- ④ 実際の電力変動と展開係数の変動の関係を線形近似

表 6 登録した機器情報

Table 6 Registered device information.

Device Name	空調機・冷凍機	IH 機器	照明	電子レンジ
Dwt Coefficient Number	15	48	3	49
Threshold	0.02	0.5	-0.02	0.08
Power Usage Coefficient	7.9	1.6	-32	5.3
Power Base	0.15	0	0	0.15

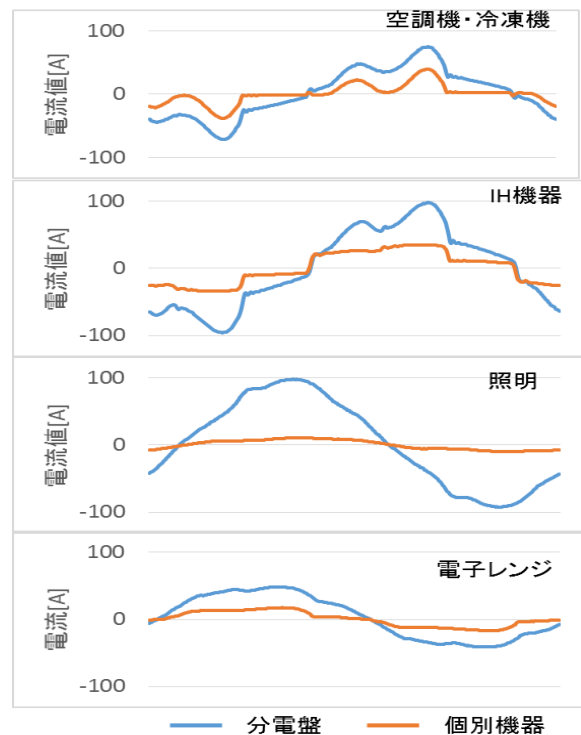


図 12 分電盤および個別機器の電力波形

Fig. 12 Current wave of each device and distribution board.

し、Power Usage Coefficient と Power Base を算出本手順により求めた機器情報を表 6 に示す。また実証実験で計測した機器個別の電流波形、および、各機器が動作中に分電盤で計測された電流波形の例を図 12 に、図 12 の電流波形をウェーブレット変換した結果を図 13 に示す。また、図 13 において、Dwt Coefficient Number として登録した展開係数を赤丸で示す。Dwt Coefficient Number は、必ずしも、各機器で最大の展開係数を有するシフト数とはなっていない。これは、分電盤で計測する電流波形では、他の機器の影響を受ける場合があるためであり、精度を高めるためには登録手順②で示したように、分電盤で計測される電流の展開係数の中から、機器の消費電力と相関の高い展開係数を選択することが重要となる。

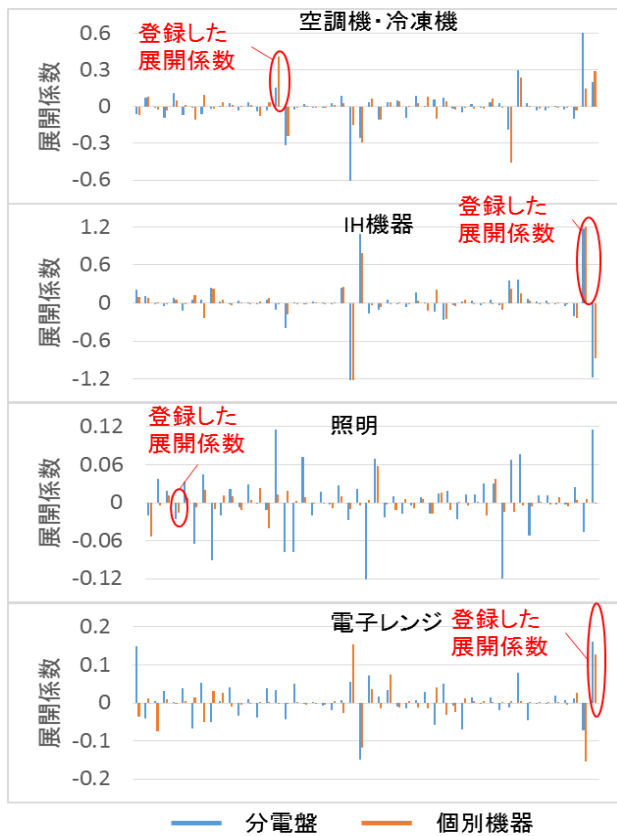


図 13 ウェーブレット変換後の展開係数  
Fig. 13 Wavelet development coefficients.

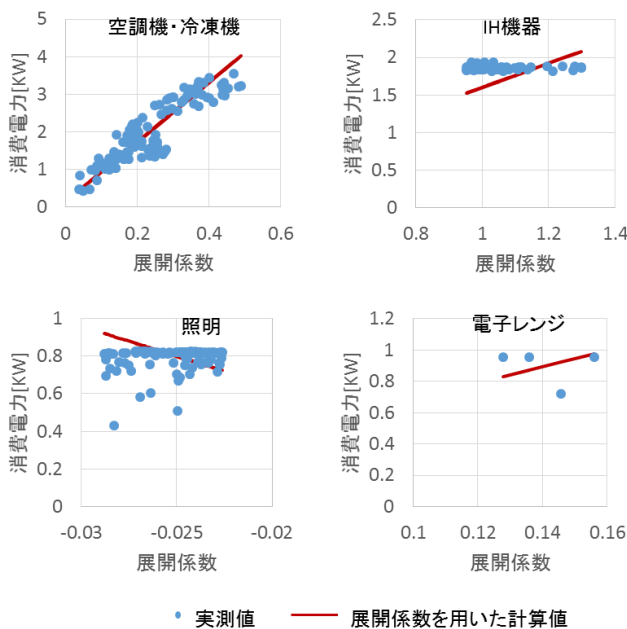


図 14 消費電力と展開係数の関係  
Fig. 14 Relation between electric power and DWT coefficient.

図 14 に、実証実験日の 0 時～1 時における各機器の消費電力（実測値）と展開係数の関係を示す。また、機器情報を用いた算出した計算値も示す。空調機・冷凍機に関しては、実測値は展開係数にほぼ比例しており、計算値とも同じ傾向であることが確認できる。IH 機器、照明に関し

表 7 実証実験の結果

Table 7 Test result overview.

機器	機器の状態推定	消費電力推定(MAPE)	
		10 分毎	1 日積算
空調機・冷凍機	100%	12%	7%
照明	99%	27%	4%
IH 機器	89%	45%	0.1%
電子レンジ	93%	15%	26%

ては、計算値には傾きがあるが、実測値はほぼ一定の値となっている。計算値に傾きがある理由は、これらの機器の消費電力はステップ状に変化するが、計算値は他の時間帯で消費電力の大きな（あるいは小さな）場合も含めて、1 日全体で線形近似をしたためである。また、同じ実測値でも、展開係数に幅があるのは、ノイズや他の機器の影響と思われる。計算値より実測値が大きな場合と小さな場合がほぼ同じ頻度であるため、消費電力量として積算することで影響を低減できる。電子レンジに関しては、動作回数が少なかったためサンプルが少ないが、傾向としては照明や IH 機器と同じと思われる。以上のように展開係数から消費電力の推定が可能であることが確認できた。

### 5.5 推定精度の評価方法

今回開発したシステムを、1 日の機器稼働状態の推定、および、消費電力の推定の 2 項目で評価した。

#### (1) 機器稼働状態の推定

測定間隔である 30 秒ごとに、対象機器の稼働状態 (ON/OFF) の推定値と実際の状態を比較し正解率を求めた。

#### (2) 消費電力の推定

エネルギーマネジメントにおいては、1 時間内に消費される電力量を抑えることが重要となる。そこで、消費電力量をモニタリングしながら機器の制御ができるように 10 分ごとの積算電力量を見える化することを想定し、10 分ごとの積算電力量の推定能力を評価することにした。開発したシステムにおける測定間隔は 30 秒であるため、30 秒ごと消費電力を 10 分間積算して電力量を求めている。実測した電力量と、本システムでの推定電力量を比較し、平均絶対比率誤差 (MAPE) で評価した。また、1 日分の合計消費電力量に関しても実測値と推定値の誤差を評価した。

### 5.6 推定精度の評価結果

推定精度の評価結果の概要を表 7 に示す。また、対象機器の状態推定の結果を図 15 に、対象機器における消費電力推定の時系列評価を図 16, 図 17, 図 18, 図 19 に、実測値と推定値の分散図を図 20 に示す。

実証実験の結果、機器の状態推定に関しては、おおよそ



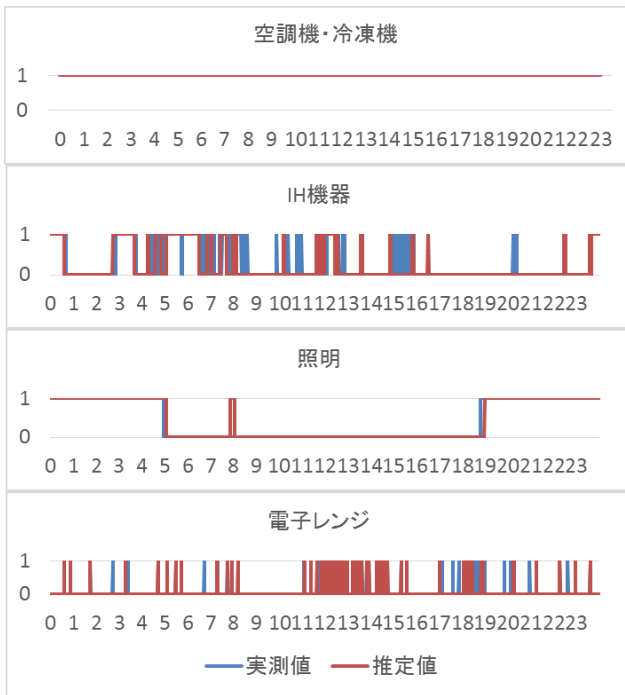


図 15 状態推定の結果

Fig. 15 Result of device status estimation.

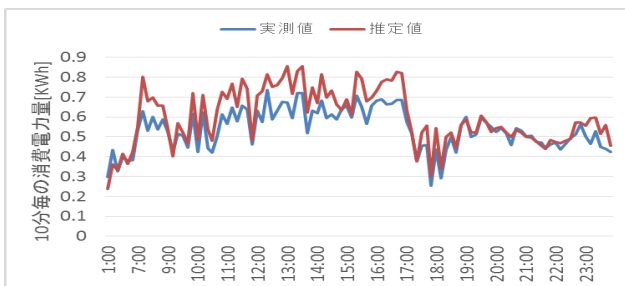


図 16 電力推定結果 (空調機・冷凍機)

Fig. 16 Result of power usage estimation (air conditioner, chiller unit).

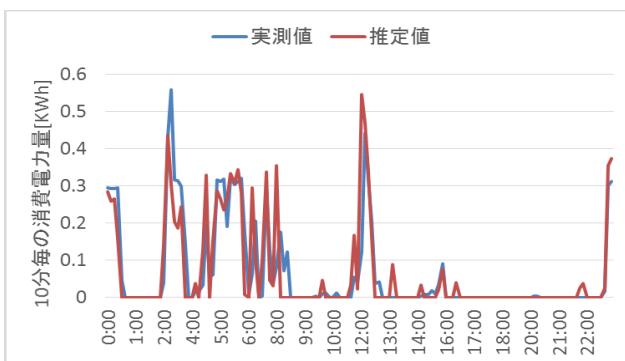


図 17 電力推定結果 (IH 機器)

Fig. 17 Result of power usage estimation (IH heater).

90%以上の精度で機器の動作状態の識別ができており、先行研究と同等の状態推定精度を実現できている。よって、実用レベルに達していると考えられる。

消費電力の推定に関して、空調機・冷凍機、および電子

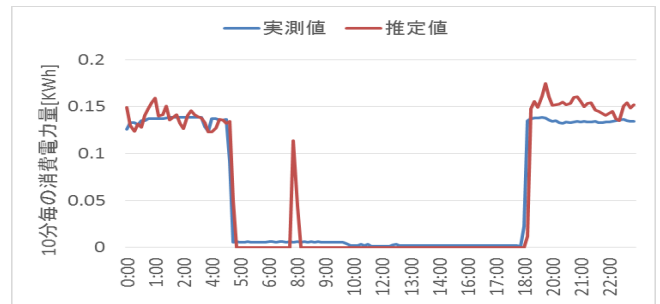


図 18 電力推定結果 (照明)

Fig. 18 Result of power usage estimation (lighting).

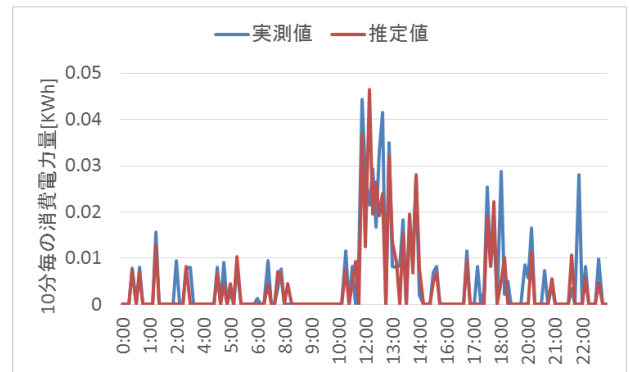


図 19 電力推定結果 (電子レンジ)

Fig. 19 Result of power usage estimation (microwave oven).

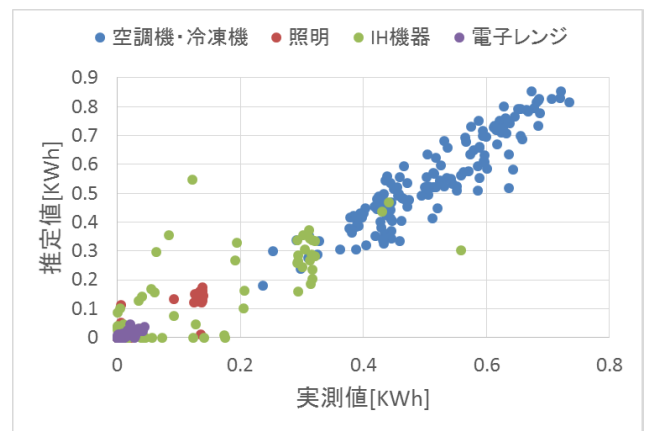


図 20 消費電力推定分散図

Fig. 20 Dispersion diagram of real power usage and estimated power usage.

レンジに関しては、MAPEが15%以下となる精度を得られることが確認できた。これは、電力見える化、ピークカット制御に有効に活用できるレベルであると考えられる。また、照明では、10分ごとのMAPEが27%となっているが、1日の合計消費電力量で見れば4%と小さな誤差となっている。これは、誤差が極端に大きくなっているケースがあり(全体の1.4%)、全体のMAPEを大幅に悪化させている。誤差が極端に大きいケースを除くと、MAPEは9.8%となり、ほぼ正しく消費電力の推定ができています。IH機器に関しては、MAPEが45%であり、また、推定値のばらつき

も大きい結果となった。これは、IH 機器の特徴点（シフト数  $k$ ）が空調機・冷凍機の影響を受けやすいところにあり、かつ、空調機・冷凍機の合計電力は IH 機器の電力の 2~3 倍程度あるため、空調機・冷凍機の電流成分が IH 機器の特徴点に影響していると思われる。対策としては、他の機器の影響を受けにくいシフト数  $k$  を選択する、複数のシフト数  $k$  を使用する、使用するシフト数  $k$  を機械学習により選択するなどが考えられる。

1 日の合計消費電力量に関しては、対象とした機器でほぼ正しく消費電力量を推定できた。これにより、本システムは、1 日の消費電力の大きな内訳を把握するのに活用できると考える。

以上のように、今回の実証実験を通して、提案手法は、未登録の機器がある状態でも、推定対象とした機器の状態、および、消費電力量を推定できることを示した。

### 5.7 空調機・冷凍機の成分分離機能の評価

実証実験で得られた実測データを用いて、“4.4 節：類似機器の消費電力の分離機能”で検討した電力変化量の違いによる分離手法の有効性を確認する。

検証用データとして、個別に計測した空調機と冷凍機の 1 日分の実測電力から、合算した電力データを作成した。この電力データを提案手法により、合算前の個々の電力データに分離し、元のデータと比較した。なお、本検証においても、先の実証実験と同じく、10 分ごとの積算電力量の MAPE で評価している。

検証の結果を図 21、図 22 に示す。冷凍機の MAPE は 14%、空調機の MAPE は 36% となった。本手法では、正確な消費電力量を把握することはできないが、おおよその消費電力を把握することが可能と考える。

### 5.8 考察

#### (1) 消費電力推定に関して

今回のシステムでは、展開係数と消費電力の関係を比例関係と仮定した。空調機のように消費電力が連続的に変化する機器に関しては有効であるが、強/中/弱のように消費電力が変化する機器、あるいは消費電力が一定の機器が複数動作するような場合など、消費電力が階段状に変化するケースにおいては、比例関係を用いることが必ずしも適切でないことが分かった。このようなケースでは、展開係数から消費電力を推定する関数として、ステップ関数の利用が有効であると思われる。

また、今回の実証実験では、機器情報を登録した日と評価を行った日がともに夏季であり、季節による変動の影響などは評価できていない。季節変動としては、冷暖房の違い、おでん鍋、ホットドリンクショーケースなどの冬季にのみ用いられる機器の影響が考えられる。冬季のみの機器に関しては必要に応じて機器情報の登録が必要となる。空

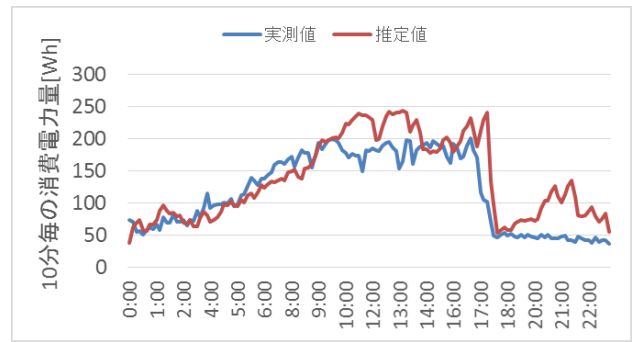


図 21 成分分離の検証結果（空調機）  
Fig. 21 Separation test result (air-conditioner).

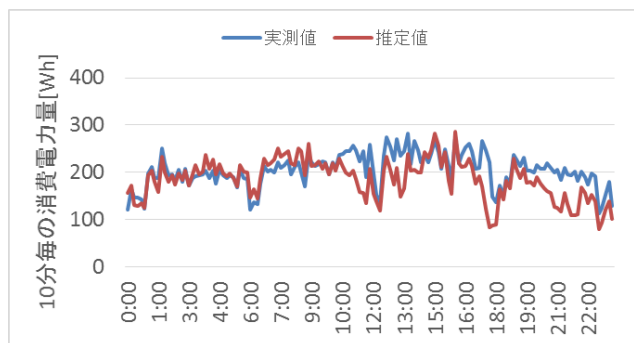


図 22 成分分離の検証結果（冷凍機）  
Fig. 22 Separation test result (chilling unit).

調機に関しては、冷房も暖房も熱交換器をインバータ制御するという動作は同じであることから、同じ電流波形になると予想され、夏季に登録した機器情報はそのまま利用できると考える。実際の影響を正しく把握するためには、通年で実証実験を行うことが有用であると考えられる。

#### (2) 多店舗展開に関して

多店舗展開を行っているケースでは、各店舗で同じ機器を用いることが多く、店舗内にある機器の構成も似ていることが多い。提案手法において、利用する機器情報は、原理的に機器のみに依存するため、他店舗でも利用可能であると考えられる。しかしながら、現実には、分電盤で計測される電流波形は、他の機器の影響やノイズの影響を受けることがあるため、機器情報を登録した店舗で使用していない消費電力の大きな機器が存在するような場合、機器情報の再登録が必要となる可能性がある。その場合、機器情報登録時に候補としたシフト数はそのまま利用し、“5.4 節：推定原理の動作確認”に示した手順のうち、②以降をやり直す。

なお、今回、他店舗での実証実験が行えなかったため、登録した機器情報を他店舗で再利用した場合の推定精度に関しては、今後の実証実験で確認が必要である。

## 6. まとめ

小規模店舗向け電力ディスアグリゲーションシステムを

開発した. 今回のシステムでは, 分電盤の1カ所で計測した電流波形をウェーブレット変換し, その展開係数を用いて動作中の機器の特定とその消費電力を推定する方式を提案した. 実際の店舗で実証実験を行った結果, 推定対象とした機器の状態推定に関しておおむね90%以上の正解率で状態を識別できること, 消費電力量推定に関して一部の機器を除き平均絶対比率誤差 (MAPE) 15%以下の精度で推定できることを確認した. また, 空調機と冷凍機のように, 電流波形に差がほとんどない場合でも, 出力の差を利用して両者の消費電力を分離する手法を検討し, 分離できる可能性を示した.

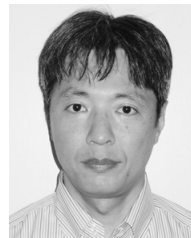
以上示したように, 今回開発したシステムは, 電力見える化, 消費電力のピーク制御などに有効に活用できると考えられる. 今回のシステムでは手動で特徴量の選択を行ったが, 機械学習などにより最適な特徴情報の選択を行い, 消費電力量の推定精度が低かった機器に対しても精度を向上させることが今後の課題である.

#### 参考文献

- [1] エネルギーの使用の合理化に関する法律 省エネ法の概要 2010/2011, 入手先 (<http://www.meti.go.jp/press/2013/09/20130930004/20130930004-2.pdf>).
- [2] エネルギー動向:平成26年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書2015) (2015).
- [3] 小松秀徳, 西尾健一郎:スマートメータデータ分析情報の活用—分析技術の動向調査と需要分析の予備的検証, 電力中央研究所報告 Y14003 (2014).
- [4] Kim, H., Marwah, M., Arlitt, M., Lyon, G. and Han, J.: Unsupervised Disaggregation of Low Frequency Power Measurements, *SIAM 2011* (2011).
- [5] Pathak, N., Roy, N. and Biswas, A.: Iterative Signal Separation Assisted Energy Disaggregation, *2015 6th International Green Computing Conference and Sustainable Computing Conference (IGSC)* (2015).
- [6] Liu, T., Ding, X. and Gu, N.: A Generic Energy Disaggregation Approach: What and When Electrical Appliances are Used, *2015 IEEE 15th International Conference on Data Mining Workshops* (2015).
- [7] 由木勝久, 中野幸夫, 天野好輝, ケルマンシャヒ バフィン: 建物の外から電気機器の使用実態を把握するモニタリング装置へのニューラルネットワーク応用, 電学論 C, Vol.122, No.8, pp.1351-1359 (2002).
- [8] 石山文彦, 井上洋思, 渡辺敏雄, 大山 孝: 分電盤電流波形より家電機器の電力消費を推定する電力見える化手法の検討, FIT2015 第4分冊, pp.377-378 (2014).
- [9] 前田 肇, 佐野 昭, 貴家仁志, 原 晋介: ウェーブレット変換とその応用, 朝倉書店 (2001).
- [10] Katsukura, H., Nakata, M., Itou, Y. and Kushiro, N.: Life Pattern Sensor with Non-intrusive Appliance Monitoring, *ICCE '09* (2009).
- [11] Chen, K.Y., Gupta, S., Larson, E.C. and Patel, S.: DOSE: Detecting user-driven operating states of electronic devices from a single sensing point, *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, St. Louis, MO, pp.46-54 (2015).
- [12] OSGi Alliance, available from (<http://www.osgi.org>).
- [13] 分電盤センサのみで家電機器個々の電力消費量を見える

化, NTT 研究開発この一年 2013 年報, pp.N-19 (2013).

1. OSGi は, 米国 OSGi Alliance の登録商標です.
2. Java は, Oracle Corporation およびその子会社, 関連会社の米国およびその他の国における登録商標です.
3. Linux は, Linus Torvalds 氏の日本およびその他の国における登録商標または商標です.



尾崎 友哉 (正会員)

1990 年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了. 同年 (株) 日立製作所入社. 組み込みシステム, ユーザインタフェース, EMS (Energy Management System) に関する研究開発に従事.



内田 尚和

2005 年法政大学大学院工学研究科修士課程修了. 同年 (株) 日立製作所入社. 組み込み機器に関する研究開発に従事.



峰野 博史 (正会員)

1999 年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了. 同年日本電信電話 (株) 入社. 2002 年 10 月より静岡大学情報学部助手. 2011 年 4 月より静岡大学情報学部准教授. モバイルコンピューティング, 知的 IoT システムに関する研究に従事. 博士 (工学).