

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^{†1} 内田尚和^{†1} 峰野博史^{†2}

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による省エネへの意識の高まりから、近年 EMS 市場が注目されている。EMS の主要な機能の一つとして、電力見える化があり、これを低コストで実現するための技術として、分電盤一ヶ所で計測する電流波形から動作中の機器の識別と消費電力の推定を行うディスアグリゲーション技術がある。

本研究では、ディスアグリゲーション技術を用いた電力計測システムを開発し、小規模店舗の代表例であるコンビニエンスストアで実証実験を行った。その結果、90%以上の正解率で機器の稼働状態を推定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^{†1} NAOKAZU UCHIDA^{†1}
HIROSHI MINENO^{†2}

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 research, we have developed an EMS with disaggregation technology and test it at the small store. And the result shows the system can identify the device status in the store more the 90% accuracy.

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)におけるエネルギーの使用の合理化をより一層推進すること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、事業者工場・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)。

従来のEMSで詳細な電力量の見える化を行うためには、見える化を行う箇所・電気機器の数だけ計測用の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高くなってしまいう問題があった。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が注目されている。電力ディスアグリゲーション技術では、分電盤一ヶ所で計測する電流波形から動作中の機器の識別と消費

電力の推定する。この技術により、機器ごとにセンサを設置する必要がなくなるため、設置のコストや手間を省くことができなどのメリットがある。

そこで、本研究の目的は、多店舗に展開可能かつ低コストで実現できる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、実際の店舗に適用することにより、その有用性を確認することにある。

2. 先行研究

電力ディスアグリゲーション技術では、あらかじめ機器の特徴データを登録あるいは学習し、分電盤に設置した電流センサの計測データと特徴を照らし合わせることで、動作している機器を推定する。機器の特徴データの登録・学習の方法としては、ニューラルネットワークを用いて学習する方法3)、HMMモデルを用いる方法4)、ウェーブレット変換5)を用いる方法6)などが提案されている。ニューラルネットワークを用いる方法やHMMモデルを用いる方法では、複数の機器が同時に稼働している場合、組み合わせ的に学習すべきパターンが増えるという課題があり、多店舗への導入は適さない。一方、ウェーブレット変換を用いる方式は、1周期分の電流波形から特徴を抽出することができ、その特徴量は基本的に機器のみに依存する。この方

^{†1}(株)日立製作所
Hitachi Ltd.
^{†2} 静岡大学
Shizuoka University

式では、多店舗展開を行っているような場合、各店舗で同じ機器を用いることが多いため、一度機器データの登録を行えば他の店でも同じデータを活用することも可能となる。しかしながら、これらの研究では、動作中の機器の特定のみであり、消費電力の推定は行っていない。

一方、石山らは、分電盤電流波形より家電機器の電力消費を推定する手法を提案している⁷⁾。この手法では、各機器の電流波形から基準となる電流波形を算出し、観測された電流波形と各機器の基準電流波形の和が最小になる係数をもとめることで電力を推定している。しかしながら、提案手法では、毎回最小二乗法で誤差が最小となる係数を求める必要がある。また、家庭内のエアコン、テレビ、冷蔵庫などの家庭内機器を対象としており、小規模店舗への適用は報告されていない。

そこで、本研究では、多店舗への展開を視野にいれ、ウェーブレット変換を用いた機器の状態推定を採用し、さらに、同じく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、実際に小規模店舗で実証実験を行うことで、その有用性を確認する。

3. 小規模店舗向けディスアグリゲーションシステム

3.1 ウェーブレット変換を用いた推定原理

一般的に、ヒータなどの線形負荷を除いた機器は、それぞれ特徴的な消費電流波形を有する。これらの特徴は、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。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。このことから、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できると考える。

また、ウェーブレット変換の展開係数は、波形の振幅(つまり電力)に比例する。この性質を利用することで、展開係数の大きさから電力を推定できると考える。

以下、提案する方式の詳細について説明する。

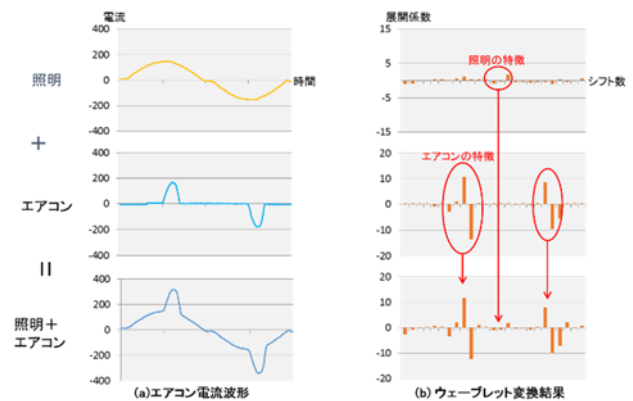


図 1 機器推定の原理

Figure 1 Basic mechanism to identify devices

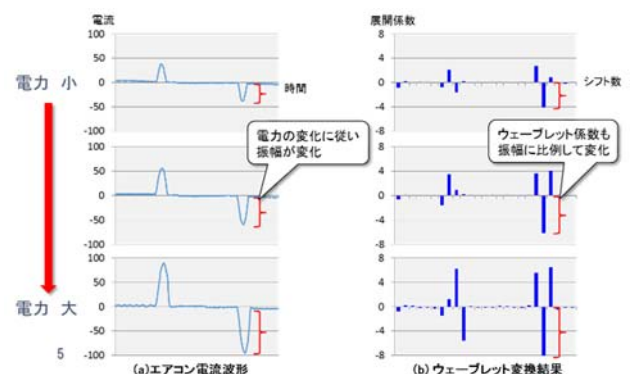


図 2 電力推定の原理

Figure 2 Basic mechanism to estimate power usage

3.2 機器情報の登録と推定

3.2.1 機器情報の登録

本方式では、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。登録機器情報の例を表 1 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ことが予想される。まずは基礎評価として、一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一周期分の電流波形を計測し、式 1 を用いて、計測したデータを離散ウェーブレット変換して展開係数 $w_k^{(4)}$ を抽出する。

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

ここで、 $f(t)$ は信号、 $\psi(t)$ マザーウェーブレット、 k はシフト数である。また、 4 は離散ウェーブレット変換のレベル(Dwt Level)である。レベルが低いと係数の値が小さいためノイズ成分の影響を受けやすく、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。

本方式では、離散ウェーブレット変換後に最大値を持つ展開係数のシフト数 k を特徴成分(Dwt Coefficient Number)として登録する。そして、推定時に計測するデータから得られるシフト数 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。そこで、この性質を利用することで、電力変動にも対応可能な電力推定を実現できると考え、下記の式を用いて電力を推定する方式を提案する。

$$\text{Power} = \text{Power base} + \text{Dwt coefficient} \times \text{Power usage coefficient} \quad (\text{式 2})$$

ここで、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となる。これらの値は、実際の電力計測の結果と照らし合わせて決定する。

表 1 機器登録情報

Table 1 Device Information

Item	Value
Device Name	Light
Dwt Level	4
Dwt Coefficient Number	15
Threshold	0.4
Power Usage Coefficient	43
Power Base	20

3.2.2 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 での交流一周期の電流波形を計測する。

(2) 離散ウェーブレット変換

計測したデータを離散ウェーブレット変換し、展開係数 $w_k^{(4)}$ を抽出する。

(3) 機器の特定

機器登録情報のシフト数 k を参照し、(2)で得られた $w_k^{(4)}$ からシフト数 k の展開係数を取得する。そして、そ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登録情報に関して行う。

(4) 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、機器登録情報の Power usage と Power base を用いて、(式 2)により消費電力を推定する。

3.3 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 3 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、LAN で接続されている。計測装置は分電盤近くに設置して電流を計測し、計測装置で分析を行う。データ解析装置では、提案手法に基づいて機器状態と消費電力の推定を行う。

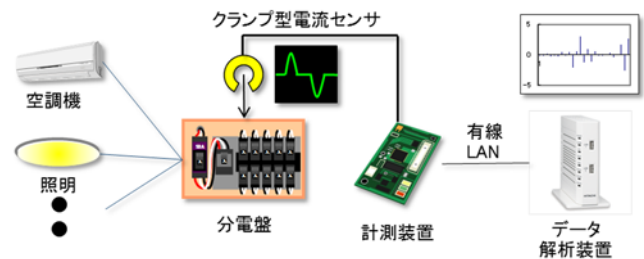


図 3 システム構成図

Figure 3 System block diagram

(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 4 に、また、スペックを表 2 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 により電流の値が取得する。また、ネットワーク I/F は、本装置とデータ解析装置をネットワーク経由で接続しており、サンプリングした電流波形を転送する。

AD コンバータの分解能については、事前の検討結果をベースに、サンプリングレート 20kHz、量子化ビット 12bit もを用いた。さらに、計測時刻を記録するために RTC(Real Time Clock)を搭載した。

なお、電力の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 秒とした。

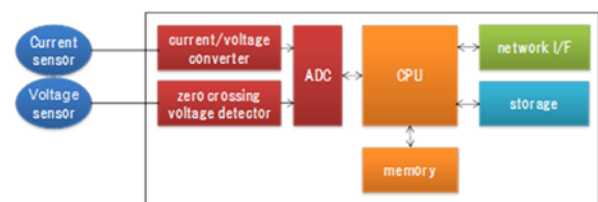


図 4 計測装置のブロック構成図

Figure 4 Block diagram of measuring part

表 2 計測装置のスペック

Table 2 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

(2) データ解析装置

データ解析装置には、電力の見える化機能を提供できるようにするため、同機能を有する 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、その上に各種デバイスドライバとブロードバンドルーター機能が実装されている。さらに、Java™VM と OSGi™ フレームワークを搭載し、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一つとして開発を行った。

EMS コントローラ試作機のソフトウェア構成、スペックはそれぞれ図 5、表 3 の通りである。

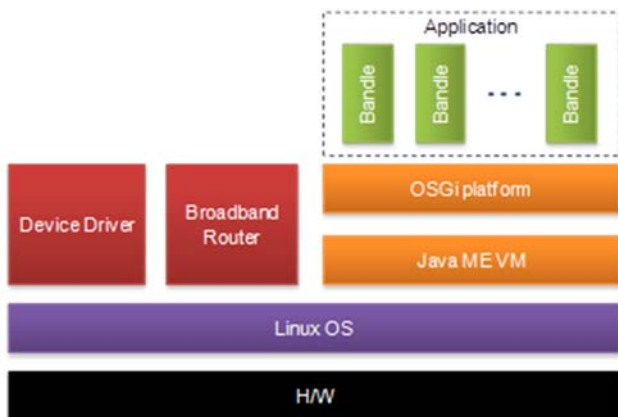


図 5 EMS コントローラ試作機のソフトウェア構成
Figure 5 Software structure of EMS controller

表 3 EMS コントローラ試作機のスペック

Table 3 Specification of EMS controller

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

4. 実証実験

4.1 実験の概要

今回実証実験を行った店舗は、24 時間営業のコンビニエンスストアであり、床面積は約 200 m²となっている。一般のコンビニエンスストアと比較すると大掛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 4 に示す機器が接続されている。

表 4 設置機器

Table 4 Devices in the store

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

今回開発したシステムを上記店舗に設置した(図 6)。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 を設置した。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。

なお、実証実験は夏期(6 月~7 月)の複数日にわけて実施している。

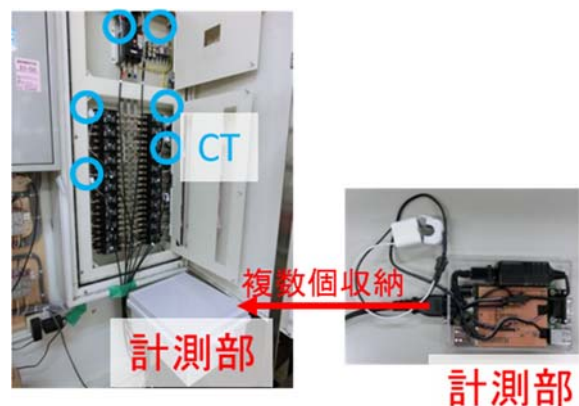


図 6 設置の様子
Figure 6 Deployment of the system

4.2 事前調査

実証実験に先立ち、店舗における消費電力の事前調査を行った。結果を図 7 に示す。事前調査の結果から、以下のことが判明した。

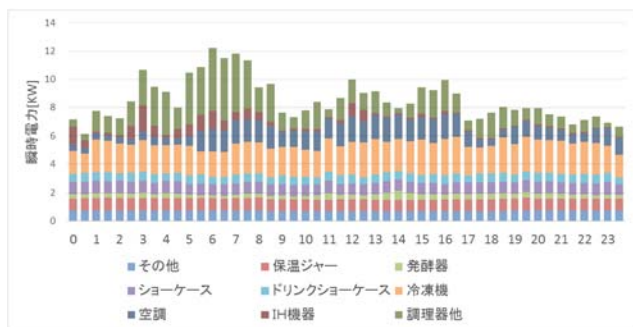
(1) 電力系

- 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も 2 割程度。
- 電力消費ピークは朝方で、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（ポスター看板，ポール看板，駐車場照明用水銀灯）。
- ・ 日中は約半分の電力をデリカ・バイク関連（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一日を通してほぼ一定出力



(a) 動力系の消費電力



(b) 電灯系の消費電力

図 7 事前調査結果

Figure 7 Result of power usage in one day

一定の電力を消費することがわかっている機器に関しては，リアルタイムで変化を把握する必要性が少ない．そのため，変化の大きな機器である空調機，冷凍機，看板照明に加え，出力が高い IH 機器と電子レンジを本システムによる推定対象として選択した．

なお，ヒータなど線形負荷の調理機器は消費電力が大きい，ウェーブレット変換を行った際に特徴が現れないことがわかっているため，推定対象からは除外している．

4.3 評価方法

今回開発したシステムに関して，以下の 2 つの項目について評価した．

(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) 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．なお，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．実測電力量と，本システムでの推定電力量を比較し，絶対平均比率誤差(MAPE)で評価した．

4.4 実験結果

推定精度の評価結果の概要を表 5 に示す．また，対象機器の状態推定の結果を図 8 状態推定の結果図 8 に，対象機器における消費電力推定の時系列評価を図 9～図 12 に，また，実測値と推定値の分散図を図 13 に示す．なお，空調機・冷凍機の状態推定は 100%であったため，図 8 から除外している．また，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できなかったため，空調機と冷凍機の合計電力の推定精度を評価している．

機器の状態推定に関しては，おおよそ 90%以上の精度で機器の動作状態の識別ができており，実用レベルに達していると考ええる．

空調機・冷凍機，および電子レンジに関しては，85%以上の精度を得られることが確認できた．これは，電力の見える化，ピーク制御などに有効に活用できるレベルであると考ええる．

また，看板照明では，10 分ごとの誤差が 27%となっているが，1 日電対で見れば 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%)，これが全体の MAPE を大幅に悪化させている．これらを除くと，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．

しかしながら，IH 機器に関しては，誤差が 27%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・冷凍機の特徴点の位置に近く，かつ，空調機・冷凍機の合計電力は IH 機器の電力の 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 の選択，複数のシフト数 k の利用，また，これらの値を機械学習により選択するなどが考えられるが，今後の検討課題としたい．

なお，1 日の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することができた．これにより，本システムは，1 日の消費電力の大まかな内訳を把握するのに活用できると考える．

表 5 実証実験の結果
Table 5 Test Result Overview

機器	機器の 状態推定	電力量推定 精度(10分毎)	電力量推定 精度(1日)
空調機・冷 凍機	0%	12%	7%
看板照明	1%	27%	4%
IH 機器	11%	45%	0.1%
電子レンジ	7%	15%	26%

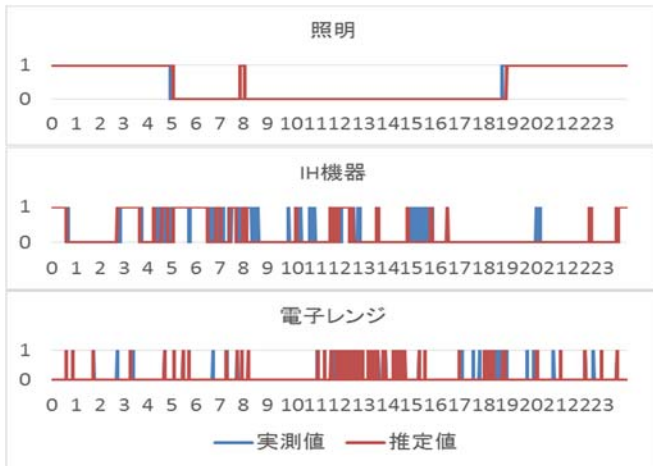


図 8 状態推定の結果
Figure 8 Result of device status estimation

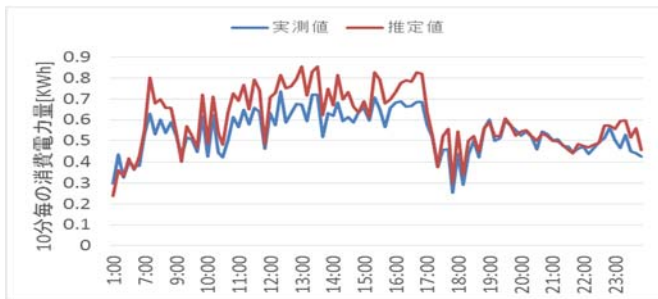


図 9 電力推定結果(空調機・冷凍機)
Figure 9 Result of power usage estimation (air conditioner, chiller unit)

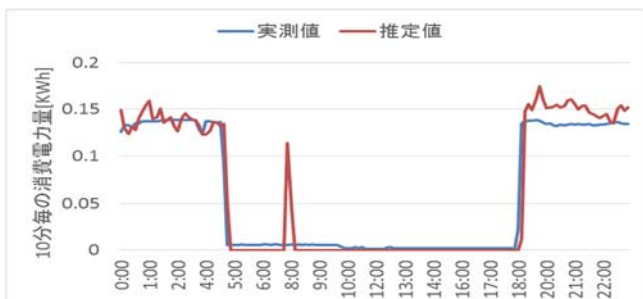


図 10 電力推定結果(照明)
Figure 10 Result of power usage estimation (lighting)



図 11 電力推定結果(IH 機器)
Figure 11 Result of power usage estimation (IH heater)



図 12 電力推定結果(電子レンジ)
Figure 12 Result of power usage estimation (microwave oven)

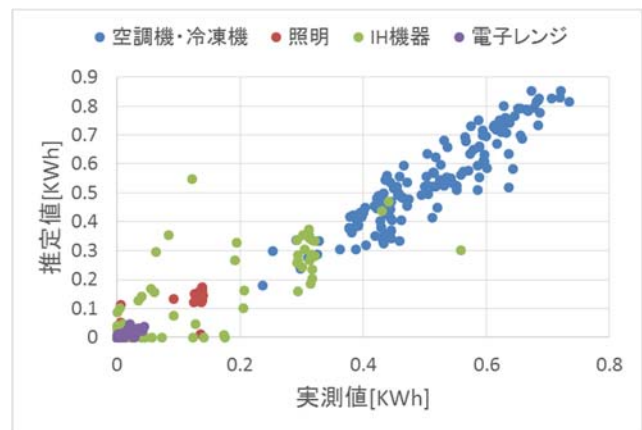


図 13 消費電力推定分散図
Figure 13 Dispersion diagram of real power usage and estimated power usage

5. 空調機・冷凍機の成分分離に関する考察

実証実験の結果、空調機と冷凍機の電流波形は極めて近い形状をしている(図 14)ため、そのままでは、個別の電力の推定が困難であることがわかった。以下では、その分離方法について考察する。

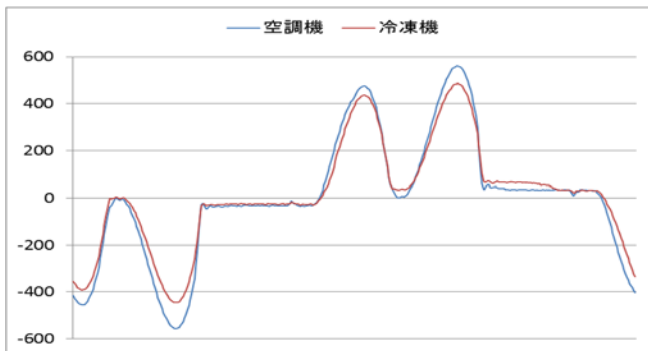


図 14 同一電力時の空調機と冷凍機の電流波形比較

Figure 14 Comparison of the current wave form between an air-conditioner and a chilling unit.

5.1 分離方式の検討

空調機と冷凍機の電力波形，時間的な変化などの分析を行った結果，高周波成分，電力の変化に特徴があることがわかった．そこで，これらの特徴を活用した分離方法について考察する．

(1) 高周波サンプリングによる電流波形比較

今回開発したシステムでは 20KHz で電流波形のサンプリングを行ったが，高周波成分を検出できるように，96kHz でサンプリングを行い，空調機と冷凍機の電流波形を計測した．その結果，10kHz～48kHz の成分に空調と冷凍機で異なる特徴が確認でき，サンプリングレートを上げれば空調・冷凍機の区別ができる可能性があることがわかった．しかしながら，本手法では高精度の 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，本システムでの採用は難しいと判断した．

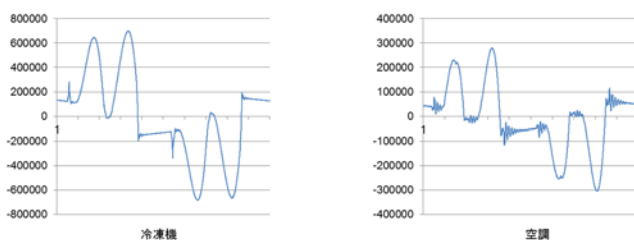


図 15 空調機と冷凍機の電力波形(96KHz サンプリング)

Figure 15 Current wave form of an air-conditioner and a chilling unit (96KHz sampling).

(2) 電力変化量の違いによる分離

空調機と冷凍機それぞれの日分の実測データを用い，電力の推移について 30 秒ごとの電力の変化量(Δp)を算出し， Δp の大きさを 5W 単位で集計してヒストグラムを作成した．結果を図 16 に示す．この結果から，空調機に関しては Δp が 40W 未満の場合が多く，反対に冷凍機に関しては 40W 以上が多いことがわかった．この結果から， Δp が 40W 未満の場合は空調の電力変化，40W 以上の場合は冷凍機の変化とみなし，全体の電力からそれぞれの電力の

分離することが可能と考えた．しかしながら，単純に 40W を閾値とした場合，正負のバランスが崩れてしまうため，24 時間全体でバランスがとれるように閾値を調整した．図 17 に本手法による分離処理の処理フローを示す．

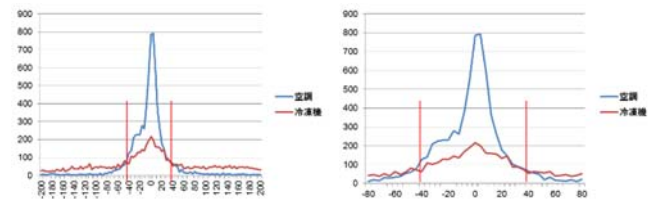


図 16 電力の変化量(Δp)と閾値の調整

Figure 16 Variation of power change

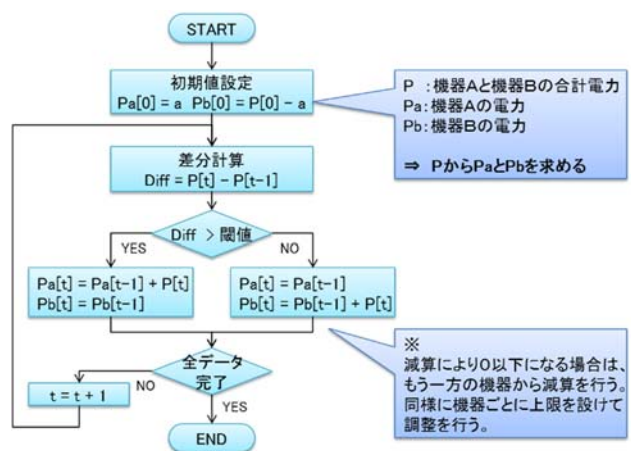


図 17 成分分離の処理フロー

Figure 17 Flow chart to separate the power usage of air-conditioner and chilling unit

5.2 検証

実証実験で得られた実測データを使って，本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，2 つを合算した電力データを作成した．この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 18，図 19 に示す．冷凍機の MAPE は 14%，空調機の MAPE は 36%となった．提案手法では，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．



図 18 成分分離の検証結果(空調機)
Figure 18 Separation test result (air-conditioner)

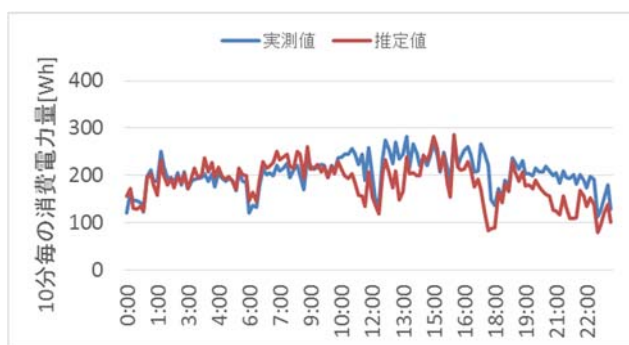


図 19 成分分離の検証結果(冷凍機)
Figure 19 Separation test result (chilling unit)

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。そして、実際の店舗で実証実験を行った結果、機器状態検出に関しては概ね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は一部の機器を除き85%以上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。また、1日の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、大まかな内訳を把握するのに活用できることを示した。

以上示したように、今回開発したシステムは、電力の見える化、ピーク制御などに有効に活用できると考える。なお、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と考えている。

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,
<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)
 - 3) 由木勝久, 中野幸夫, 天野好輝, ケルマンシヤヒ パフィン: 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, 田楽論 C, 122 巻 8 号, pp.1351-1359 (2002)
 - 4) 中村久栄, 伊藤公一, 鈴木達也: 隠れマルコフモデルに基づいた電気機器の稼働状態モニタリングシステム, 電学論 B, 126 巻 12 号, pp.1223-1229 (2006)
 - 5) 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)
 - 6) Katsukura, H. Nakata, M. Itou, Y. and Kushiro N.: Life Pattern Sensor with Non-intrusive Appliance Monitoring, ICCE '09 (2009)
 - 7) 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)
1. OSGi は、米国 OSGi Alliance の登録商標です
 2. Java は、Oracle Corporation 及びその子会社、関連会社の米国及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。