

E-0903 再生可能エネルギーの大規模導入を可能とする自律協調エネルギーマネジメントシステム  
 (2) 分散型自律協調エネルギーマネジメントに関する研究

東京大学

生産技術研究所	エネルギー工学連携研究センター	准教授	岩船由美子
生産技術研究所	エネルギー工学連携研究センター	特任教授	荻本和彦

<研究協力者>

東京大学	生産技術研究所	エネルギー工学連携研究センター	特任助教	池上貴志
東京大学	生産技術研究所	エネルギー工学連携研究センター	特任研究員	八木田克英
東京大学	生産技術研究所	エネルギー工学連携研究センター	特任研究員	片岡和人

平成21～22年度累計予算額：49,648千円（うち、平成22年度予算額：19,111千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 不規則な変動を有する太陽光発電システム等の大規模導入を実現するためには、電力システム全体での需給バランス調整力を追加的に確保することが今後必要となる。住宅やオフィスビル等の需要側建物においても、快適性維持・省エネ実現と並行して需要機器の制御等による調整力確保が実現できれば、システムの安定化に大きく貢献できる。本サブテーマでは、電力システム全体での需給バランス調整力確保を担う分散エネルギーマネジメントに関する検討を行った。

需要構造を把握し、需要予測が可能になれば、太陽光発電量予測等と合わせることで家庭内機器の適切な運転計画が立案できる。また、需要構造の把握は、需要家の効用の増加に寄与しないエネルギー消費量の抽出にもつながる。分電盤における電流計測による需要予測の可能性を検討するため、集合住宅を中心とした50世帯における実測を開始し、LAN回線を通じてデータ収集するシステムの構築を行った。設置後、順次データ収集を開始してエネルギー需要構造を解析し、住宅用分電盤電流データを用いた機器別の稼働状況推定手法の開発を行った。

また、電力システム全体での需給バランス調整力を担う分散エネルギーマネジメント装置の開発を目指し、電力系統側から与えられた需要調整のためのインセンティブ情報によって家庭内の需要機器やエネルギー貯蔵装置の運転スケジュールを計画するモデルを開発した。このモデルを用い、電力価格等による機器の運転時刻の調整により、分散エネルギーマネジメントが、家庭内におけるメリットの享受と電力需給バランスの調整の両方に貢献できることを確認した。

さらに、分散エネルギーマネジメント装置の実装技術の検証のため、太陽光発電システム、蓄電池、需要を模擬するエネルギーマネジメント装置のプロトタイプを試作し、蓄電池や太陽電池シミュレータ、模擬需要等を用いて、これらの機器が接続された環境を模擬し、エネルギーマネジメント装置の動作の一部を検証した。

[キーワード] エネルギーマネジメント、需給バランス、エネルギー計測、需要予測、需要応答

## 1. はじめに

太陽光発電（Photovoltaics：以下、PV）システムの発電特性は、季節や時刻による規則的な変動に加え、天候の変化に基づく不規則な変動を有するため、現状と同程度の安定した電力供給を行いつつPVシステムの大規模導入を実現するためには、配電系統の電圧変動や周波数の変動、需給バランス制御の困難化など、様々な技術的課題を解決する必要がある<sup>1)</sup>。これらの中で需給バランス制御の困難化の問題は、今後期待される原子力発電の増加などの状況下で、低電力需要期におけるPVシステム最大発電時などに、系統における火力発電所の運転台数が減少して需給調整力が低下することに起因する<sup>1)</sup>。そのため、課題の解決に向けて追加的な調整力を確保する必要がある。調整力確保のための対策として揚水発電の活用や大規模な蓄電システムの導入などが挙げられるが、揚水発電所の追加導入は立地などに制約があり、蓄電システムは現状では非常に高価である。社会コスト最小化の観点から、電力系統側における蓄電システムの導入だけではなく、住宅やオフィスビル等の需要側建物においても、快適な住空間・働空間の維持や省エネルギー（以下、省エネ）の実現と並行して、需要機器の運転制御やPVシステムのインバータ制御による出力抑制、蓄電池の充放電など、需給バランス調整力を確保するための対策を講じる必要がある。

本研究では、図1に示すように需給バランス調整力確保のためのシステムとして、電力供給地域全体を扱う集中エネルギーマネジメントと住宅やオフィスビルなどにおける分散エネルギーマネジメントが協調して制御を行うシステムを想定した。個別の分散エネルギー技術、エネルギー貯蔵技術、エネルギー利用技術とサブテーマ1で検討するPV発電出力予測技術を利用した、図1の左下部に相当する建物レベルの分散エネルギーマネジメントの研究を行った。

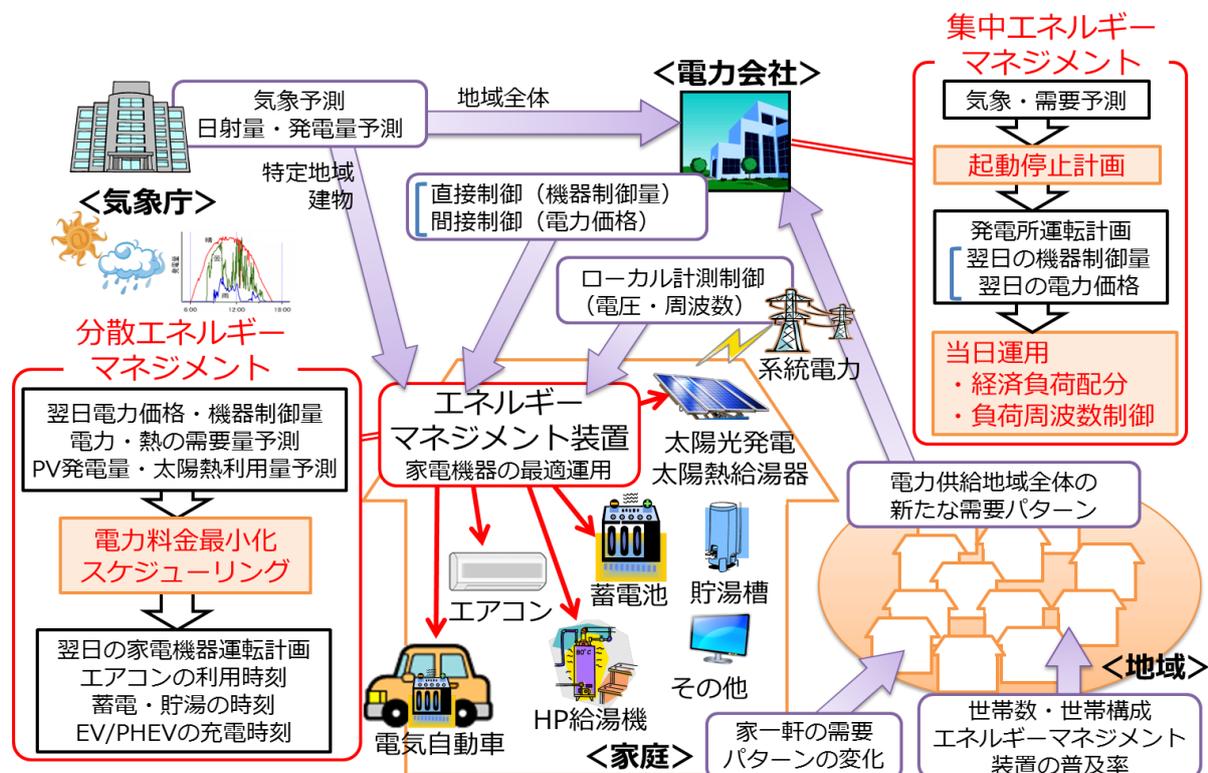


図1 集中と分散エネルギーマネジメントの協調

## 2. 研究目的

建物レベルの分散エネルギーマネジメントでは、住宅における需要をエネルギー消費量としてではなく、快適な空間を維持するためのサービス量として把握することが重要である。複数の住宅における時刻別の室内環境およびエネルギー消費量を詳細に実測し、エネルギーマネジメントに必要なエネルギーサービス需要量予測を実施するための住宅内エネルギー需要構造解析手法の検討を行い、さらに、室内環境に対する満足度を維持したエネルギーサービス量の評価や、快適性を損なわない範囲での制御パターンの検討を行うことを目的とした。

また、この快適性を損なわない制御範囲においてエネルギー需要機器やエネルギー貯蔵装置の制御を行う機能を有する分散エネルギーマネジメントシステムの開発を目指し、再生可能エネルギーの発電出力予測やエネルギーサービス需要予測、電力システム側からの需要調整インセンティブ情報を基にした家庭内機器の最適運転方法の解析や実時間機器運転シミュレーションを行うことで、分散エネルギーマネジメントによる効果の定量的評価を行うことを目的とした。

さらに、多くの建物への導入が想定されるエネルギーマネジメント装置の実装技術の検証のため、装置の試作および評価も行うこととした。

## 3. 研究方法

住宅内のエネルギーマネジメントを適切に行うためには、まずは中心となるエネルギー需要構造を把握する必要がある。需要構造を把握し、需要予測が可能になれば、PV発電量予測等と合わせて、PVシステムや太陽熱温水器などを含めた家庭内機器の適切な運転計画が立案できる。また、需要家の効用の増加に寄与しないエネルギー消費を発見するためにも、住宅のエネルギー消費量の実態を時刻別に詳細に把握することは非常に重要である。

そこで本研究では、千葉県柏の葉キャンパス駅周辺の集合住宅を中心とした50世帯に電力、ガスの消費量および空調室、非空調室の室温、湿度の計測器を設置し、データ収集を行った。電力消費量については、分電盤の回路ごとに1分値の計測を行い、一部家電製品については個別に計測を行った。ガス消費量については5分値の計測を行い、合わせてガス給湯器内の温水使用用途別配管の水温について1分値の計測を行うことで給湯需要の推計を行うこととした。計測したデータは、LAN回線を通して収集する環境を構築し、計測器を設置した家庭から順次データ収集を行い、収集データに基づくエネルギー需要構造の解析を行った。回路別データより機器別稼働状況を推計するために、自己組織化マップを活用したクラスタリング手法を用いたエネルギー需要構造把握手法を提案した。

次に、家庭ごとのエネルギーサービス需要構造の把握によって予測された翌日のエネルギーサービス需要量や、PV発電量の予測等に加え、電力システム側からの需要調整インセンティブ情報によって、最適に家庭内機器が運転された場合の効果を定量的に評価するため、混合整数線形計画法を用いた家庭内機器最適運転計画モデルおよび確率動的計画法などを用いた建物エネルギーマネジメントシミュレーションモデルの開発を行った。これらのモデルを用いることで、エネルギー需要機器やエネルギー貯蔵装置の運転スケジュールを調整することによって、電力システム全体の需給バランスの調整に貢献できる可能性の評価を行った。

さらに、将来、住宅やオフィスビルなど多くの建物への導入が想定されるエネルギーマネジメント装置の実装技術の検証を行うため、機器の運転制御などの必要な仕様を決定し、装置の試作

範囲を決定した上で、PVシステム、蓄電池、需要を模擬するシステムを構築し、基本的な制御に関する試験を行った。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 分電盤データを用いた住宅内電力需要構造の把握

###### 1) 住宅内電力消費構造の把握のためのデータ計測

本研究では、「分電盤」における短時間間隔の実測によって電力消費構造把握を行う手法を提案した。家電製品の大型化、多機能化による容量の増加に伴い、比較的新しい住宅においては、20以上の多数の回路に分岐した配電設備の敷設が一般的になってきている。エアコンは基本的に単独回路であり、冷蔵庫も電子レンジ等と同回路になる程度である。したがってこの回路別の電流値が得られれば、ある程度家庭内の機器別のエネルギー消費量を把握することが可能となる。計測間隔を1分と短くすることにより、回路別データをさらに機器別データに分解することも可能となる。分電盤は、需要家と電気事業者の責任分解点であり、PVシステムが導入された住宅の場合は、太陽電池系統と商用電源系統との連系点となるため、ここで得られる情報を活用して全体の需要把握とエネルギーマネジメントを行うことは非常に合理的であると言える。

本研究では、分電盤電流データによる機器稼働状況把握の可能性について検討するために、千葉県柏の葉キャンパス駅周辺のマンションを中心に50戸の世帯で2009年秋に電流消費量等の計測を開始した。計測の主目的は、分電盤データの収集であるが、最終的な分析結果の検証、住宅のエネルギー全体の構造把握を合わせて行うために、分離が比較的難しいと思われる一部の家電製品、空調室温湿度、非空調室温度及びガス消費量の計測も合わせて実施した。計測の概要及び計測システムの構成は表1及び図2に示すとおりである。

表1 計測の概要

計測対象住宅	千葉県柏の葉キャンパス駅周辺マンションを主とした50世帯（3世帯のみ戸建住宅）
主要マンションの諸元	床面積：70～110m <sup>2</sup> 世帯人員：1～5人（2008年以降入居開始） 主要設備：潜熱回収式ガス給湯器 ガス床暖房 ガスレンジ ディスポージャー ミストサウナ
測定点	電流消費量（1分間隔） 1. 分電盤回路 2. AV機器（TV、HDDレコーダー等） 3. 給湯器電源 部屋温度および湿度（1分間隔） 1. リビングルーム温度・湿度 2. 非空調室温度 3. 給湯器配管温度 ガス消費量（5分間隔）
計測期間	2009年11月開始、2年間

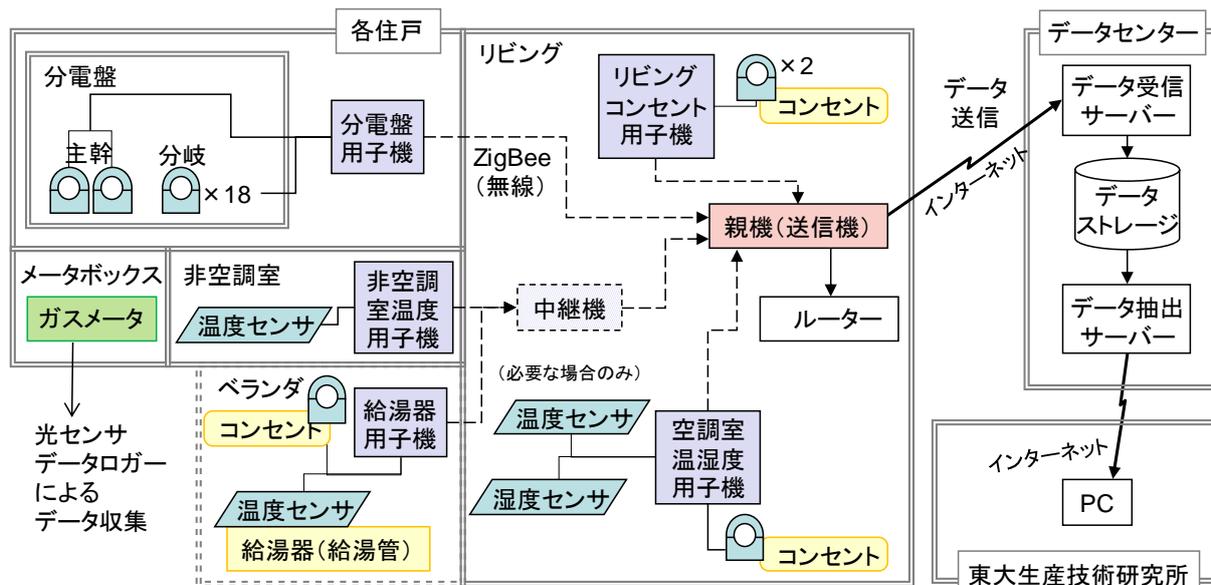


図2 計測システムの構成

電流・温度用計測器は、市販のセンサと通信回路を組み合わせ、本研究用に製作したものである。クランプ式の電流センサを用い電流値のみの計測を行っており電圧・力率の測定は行っていない。したがって、消費電力量への換算が必要な場合には、力率100%、電圧100Vと仮定して主幹合計値より消費電力量を算定する。そのため電球型蛍光灯などの力率の低い負荷が主体の回路においては、消費電力量の値は実際より大きくなる。

本システムは、データセンターへインターネット回線を介してデータを送信する親機と、住宅内へ設置された複数の子機（電流・温度計測端末）からなる。親機は、複数の子機から無線通信によって1分毎に送られてくる1分値データを受信して集約し、インターネット回線を利用して10分毎に集約したデータをデータセンターに送信している。親機と子機間の通信には、Digi International社のXBee（IEEE802.15.4準拠）を採用した。親機の設置例を図3に示す。



図3 親機の設置状況（中央の水色のLANケーブルと接続されているのが親機）

子機には、リビングコンセント用子機、空調室温湿度用子機、非空調室温度用子機、分電盤用子機、給湯機用子機の5種を用意した。リビングコンセント用子機には、テレビ（以下、TV）やハードディスクレコーダーの個別の電流計測を行うクランプ式の電流センサ2個が接続されており、空調室温湿度用子機には、クランプ式の電流センサ1個と温度センサ、湿度センサが接続されている。温湿度のセンサは、基本的に床から1m以上の点に設置した。また、非空調室温度用子機には、温度センサのみが接続されており、床から約1mの点にセンサがくるように設置を行った。

分電盤用子機には、分電盤主幹用のクランプ式の電流センサ2個と分岐回路用のクランプ式電流センサ18個が接続されており、分電盤内で回路ごとにセンサを設置した。図4に分電盤への計測器の設置例を示す。家庭への負担を最小限とするため、分電盤のふたが閉まるようにセンサを設置し、子機本体とセンサ間のケーブルは分電盤上部の穴より集約して外に出した。計測器設置後の分電盤の様子を図5に示す。



図4 分電盤への計測器の設置（左の2個が主幹用電流センサ、右が回路別の電流センサ）



図5 計測器設置後の分電盤（分電盤上部の箱が分電盤用子機）

給湯器用子機には、ガス給湯機の電力消費量計測のためのクランプ式電流センサ1個と3本の温度センサが接続されている。3本の温度センサは、温水の使用用途別配管の根本にそれぞれ設置し、温度上昇の感知により用途別の温水使用時刻を把握できるようにした。給湯器用子機の設置状況を図6に示す。



図6 給湯機用子機の設置状況

ガス消費量は、戸外のメータボックス内に光センサ式のガスロガーを設置して他とは別にデータを収集するものとした。ガス消費量の計測器およびその設置状況を図7および図8に示す。

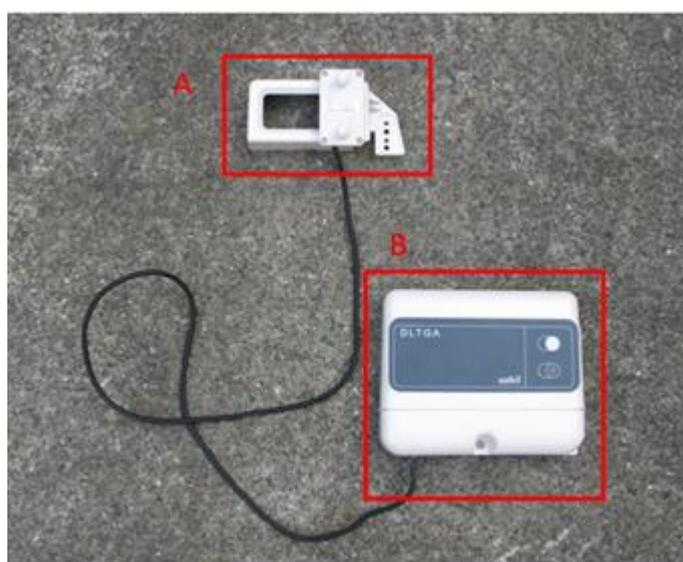


図7 ガス流量計測器 (A:光センサ、B:本体)



図8 ガス流量計測器の設置状況

ガス消費量のデータは5分値が計測器本体のメモリに蓄積されるため、数か月に1度、計測器設置家庭を訪問し、データの集約作業を行った。

## 2) 住宅用分電盤電流データを用いた機器別稼働状況推定手法の開発

本研究では、分電盤における回路別電流値を用途別・機器別へ分解するために、自己組織化マップ (SOM: Self-Organizing Map) を用いるものとした。SOMは教師なし学習のアルゴリズムを用いるニューラルネットワークモデルの一種であり、近年データマイニングの手法として脚光を浴びている。多次元のデータの情報を圧縮して低次元（多くの場合は2次元）のマップを描くため、視覚的に理解しやすいという特徴を有している。SOMを用いたクラスタリング手法として、クラスタ数が未知のデータに適用できる手法が提案されており、本研究ではこの手法を参考に回路別電流値のクラスタリングを行うものとした。以下に手順を示す。

### ① 入力ベクトルの設定

回路別電流データの特徴を表す入力ベクトルとして用いるのは、一定時間間隔に集約された、平均値、最大値、偏差の積分値である。第三の項目は、計測データ1分間隔の変動の積分値であるが、このデータを入力することにより、矩形波と変動の激しい波形を区分できることが期待される。データを集約する適切な時間間隔は、回路毎に異なると予想されるが、今回は30分とし、稼働機器の変動、機器の買い替えの可能性などを考慮して、1か月単位でクラスタリングを行った。

### ② SOMを用いたクラスタリング

SOMを用いて、①の入力ベクトルを1次元上に配置したマップに写像し、ヒストグラムを作成し、クラスタ数、各クラスタ中心を決定し、クラスタリングを行った。

### ③ 保有機器情報の入力

電流値のクラスタリング結果と機器をひも付けするためには、保有機器の消費電流情報が必要となる。機器に関する情報を提供するか否かはユーザの判断によるため、ユーザ側の協力度合いに応じて得られる情報の詳細さが決まる。機器の情報としては、回路毎に接続されている機器種類、さらに主要な機器を単独あるいは複数で使用した時の回路別電流値が必要となる。後者の値



さらに、クラスタリングの結果から得られる情報を整理したものが図10である。世帯Aのリビング回路における7月全体の出力結果を示しており、上段が日毎のクラスタ別電流消費量合計、中段が各クラスタにおける電流値を箱ひげ図で表したものの、下段が各クラスタにおける電流値の発生時間帯を示している。これは、機器に関する情報なしに、共通に提示できるレベルであり、中段、下段の情報より、機器の使用時間と、その消費アンペア水準が得られる。さらに保有機器出力に関する情報が得られれば、回路に接続されている機器が少ない場合は、この図からある程度機器別に電流消費量が推計できるものと考えられる。

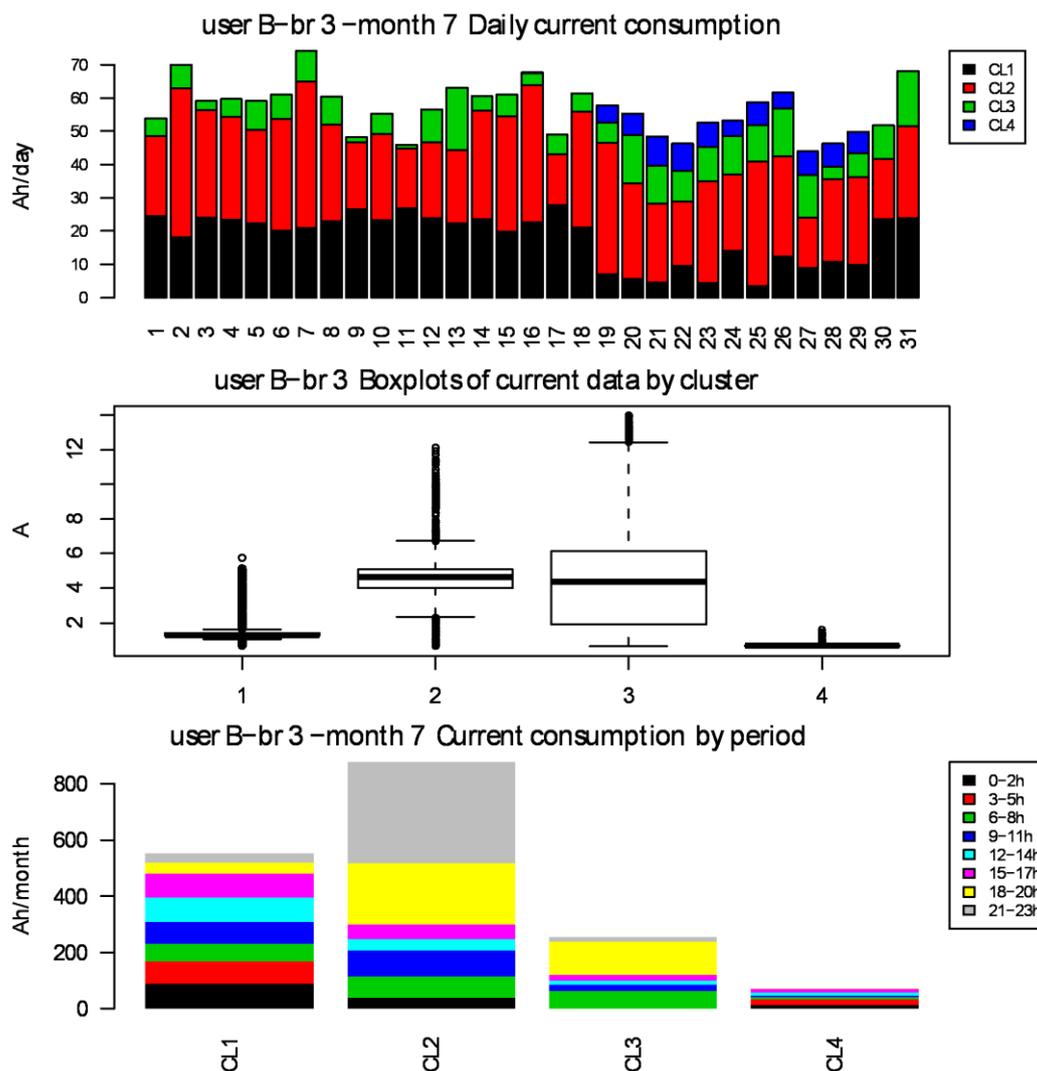


図10 世帯A月別リビング回路電流クラスタリング結果

(上：日別電流消費量、中：各時間帯の電流値の箱ひげ図、下：時間帯別電流消費量)

同様の方法を全世帯に適用したところ、各世帯、各月において、ほぼ3~5クラスタに分類されたが、クラスタ数が多くなりすぎ、このままでは機器別推定が難しい結果も一部見られた。このような場合、クラスタを統合する必要があり、クラスタ毎の統計値より自動的に集約する方法については今後検討するものとする。

このクラスタリング結果と機器とのひも付けを行い、TVの稼働状況を推計した。今回の分析に

においては、各世帯のリビング回路電流波形とTV個別計測波形より、上記3つの消費電流ランクを推定した。各世帯において下記の情報が得られているものと想定する。

- ・TVのみON時のリビング回路消費電流量
- ・TV・主要照明のみON時のリビング回路消費電流量
- ・主要照明のみON時のリビング回路消費電流量

上記のクラスタリング結果に機器へのひも付け操作を適用してTV稼働状況を推定し、検証のための別途の個別計測値と比較した。TVがない世帯、TVと冷蔵庫が同じ回路にある世帯、データ欠損が多い月などを除き、計40世帯の1月から7月までの合計271カ月分について分析を行った。

個別世帯におけるTV消費電流分解例を図1-1に示す。黒がリビング回路電流実測値、赤がTV単独の電流実測値であり、緑、青、水色が「TV+照明」、「TVのみ」、「照明のみ」の推定結果を示している。この世帯の場合、例えば7月23日の7-10時台でTVが稼働しているにもかかわらず、「照明のみ」（水色）に一部分類されているが、それ以外は「TVのみ」（青）、「TV+照明」（緑）の消費電流ランクによってTV稼働の時間帯が適切に抽出できている。

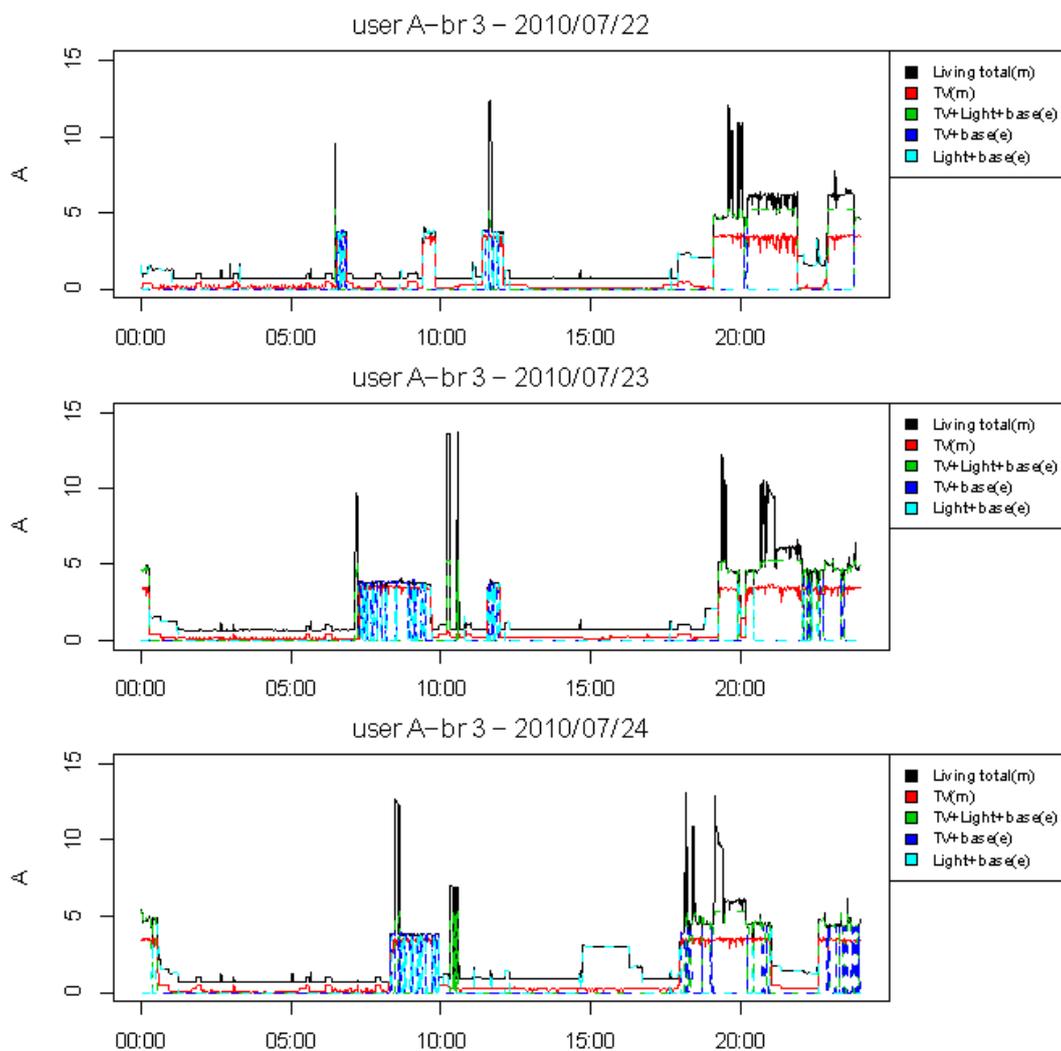


図1-1 世帯AにおけるTV及び照明消費電流分解の例  
(凡例中の“m”及び“e”はそれぞれ「計測データ」、「推計データ」を表す)

全世帯のTV稼働状況の推定結果を図12に示す。TVオン状態が正しく判別された度数、TVオフ状態が正しく判別された度数、TVオン状態が間違っって判別された度数、TVオフ状態が間違っって判別された度数を比率として表している。全271月分データの分析を行った結果、TVオン状態とTVオフ状態が正しく判別された比率が90%を越えるデータが8割であった。

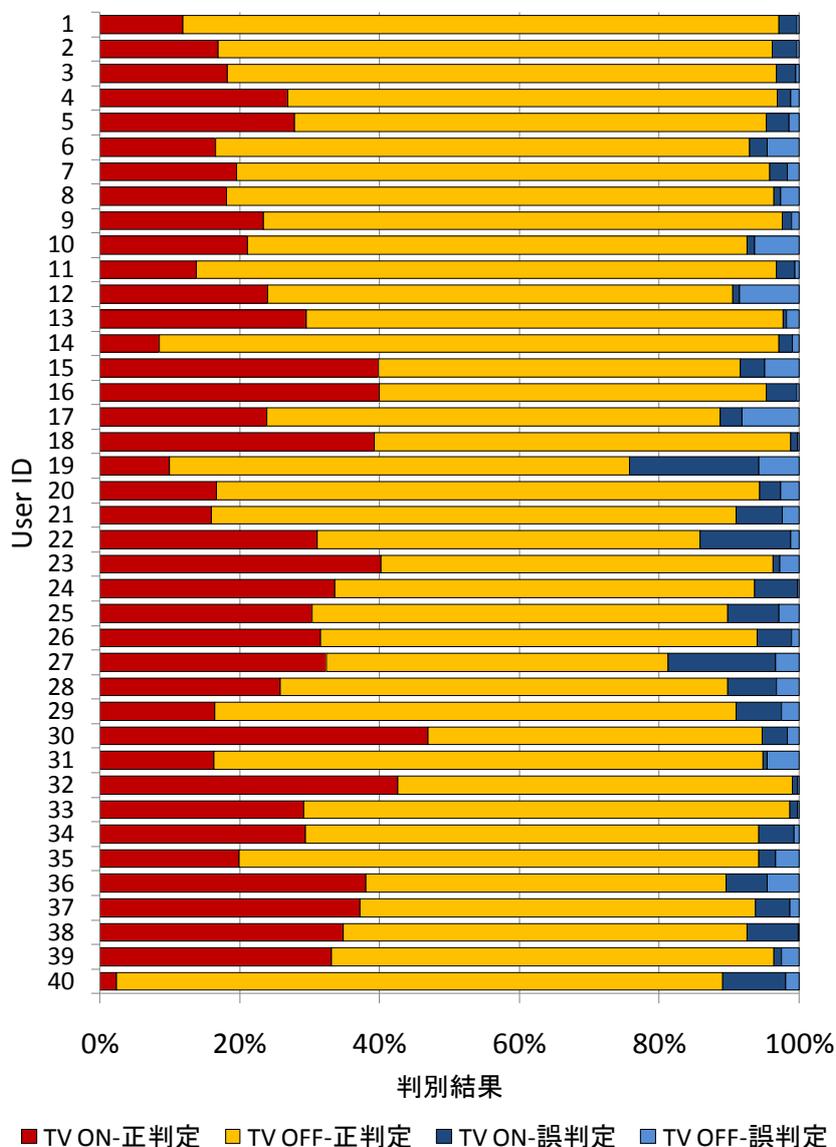


図12 TV稼働状況推計結果

冬期にこたつやハロゲンヒータなどの電気暖房器具がリビングで使用されている世帯で、TVの分解が難しく、誤判定が大きかった。例えば、こたつのサーモスタットの動作によるスパイク状の波形などが生じている世帯では、TV・照明の平均的な電流値を用いて分解の判断を行う今回の手法は適用しがたい。その他、全体にリビングで使用される機器が多く、変動が激しい消費パターンの世帯、TVの電流に比して照明の電流が大きい世帯で誤差が大きくなっている。機器とのひも付けを行い、稼働状況を推定するためには、このような誤差が生じる要因を詳細に分析し、本手法が適用可能な世帯かそうでない世帯かをあらかじめスクリーニングしておく必要があることが分かった。

## 3) 省エネポテンシャルの抽出

室内環境の快適性を損なわない範囲でどの程度省エネ余地があるのか、表2のような質問紙調査法を用いた調査を実施した。調査対象は、表1の計測機器を設置した50世帯で、まず2010年5月末に、それまでに計測した電力消費量の結果をフィードバックし、他の家庭と比較して電力消費量が多い部分や、省エネできそうな点についてコメントを行った。そして、その情報提供の約半年後である2010年10月末に、先に提示した省エネ行動について、どの程度実施し、実施した際に快適性や利便性が損なわれることがあったかを質問した。

表2 アンケート調査の概要

調査時期	調査内容
【1回目】 2010年 5月末	<p>提供フィードバック内容：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 各世帯の冬期12～2月の月別、平休日別の電力消費構造についての図（図13）</li> <li>② 計測した柏の葉地区48世帯の2月の世帯間比較および、48世帯中の位置づけの図（順位）の図（図14）</li> <li>③ 各家庭で消費が多いと思われる点、省エネできそうな点などについてのコメント</li> <li>④ 家庭でできる省エネ方法に関する一般的な資料</li> </ul> <p>調査項目：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑤ 現在の省エネ行動実践度 7段階評価（実践していない[1]～実践している[7]）で測定</li> </ul>
【2回目】 2010年 10月末	<p>提供フィードバック内容：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① 各世帯の春夏期3～8月の月別、平休日別の電力消費構造についての図（図13）</li> <li>② 計測した柏の葉地区48世帯の3～8月の各月の世帯間比較および、48世帯中の位置づけ（順位）の図</li> <li>③ 各家庭で消費が多いと思われる点、省エネできそうな点などについてのコメント</li> <li>④ 家庭でできる省エネ方法に関する一般的な資料</li> </ul> <p>調査項目：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⑤ 提示された情報を見たあとの、省エネ行動実践度 7段階評価（実践していない[1]～実践している[7]）で測定</li> <li>⑥ 省エネ行動を実践した場合の、快適性や利便性の損失度 7段階評価（損なわれない[1]～損なわれた[7]）で測定</li> </ul>

フィードバックしたデータより、ある世帯における2009年12～2010年8月の月別、平休日別の用途別電力使用量を図13に示す。世帯ごとに、どの電気機器の電力消費量の占める割合が高いかを見て取ることができる。また、計測した柏の葉地区48世帯の2010年2月の世帯間比較データを図14に示す。各世帯には、世帯間を比較した48世帯分のデータとともに、自分の世帯が48世帯の中でどこに位置するのかを情報として提供した。

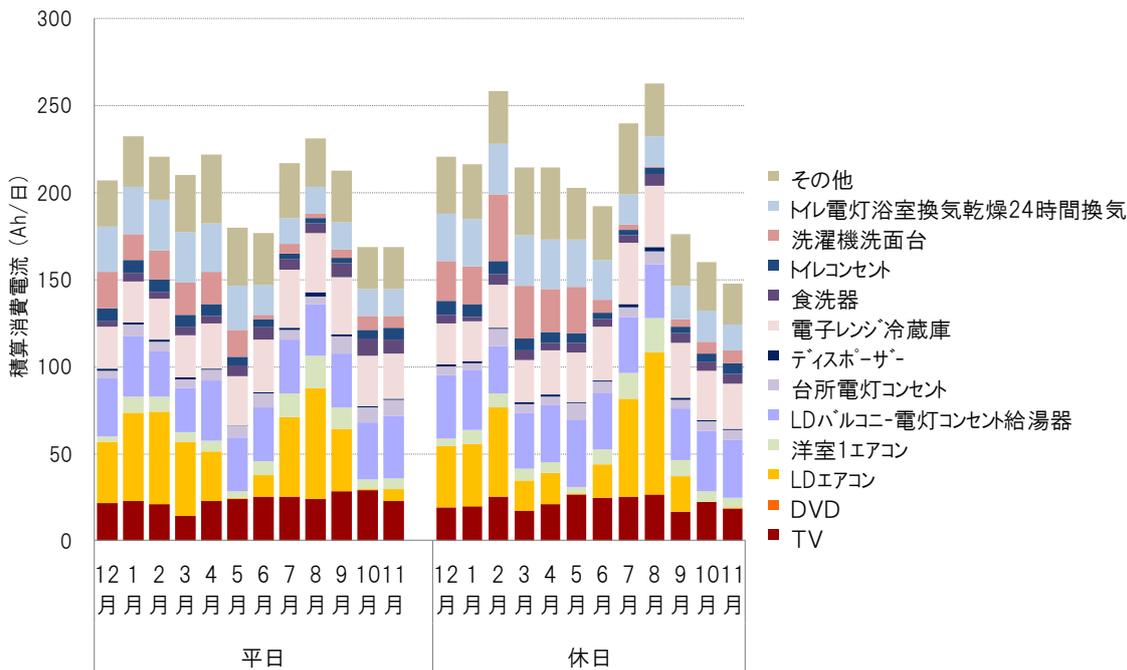


図 1 3 ある世帯（夫婦2人世帯）での用途別電力使用量の推移

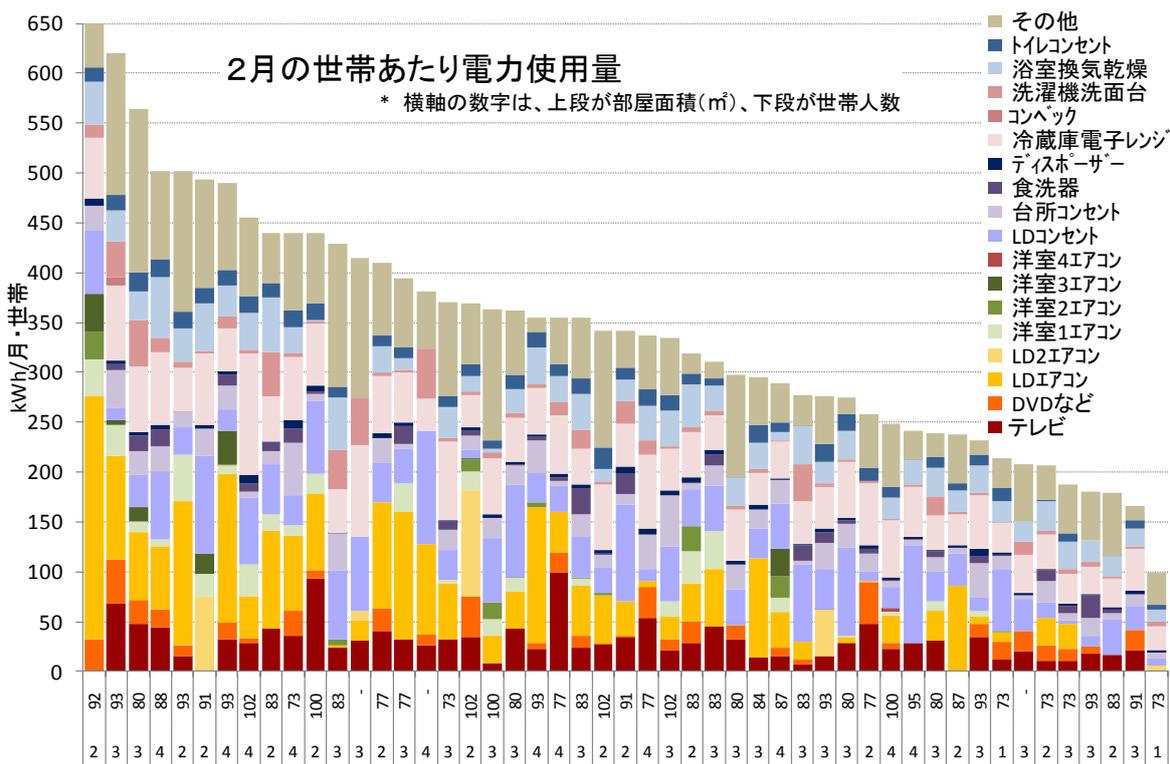


図 1 4 計測器設置世帯における 2010 年 2 月の用途別電力使用量の比較  
(グラフ下部の数字は、世帯ごとの床面積・世帯人数)

省エネ行動実践度および快適性や利便性の損失度に関する調査結果を図 1 5 に示す。これらの結果より、家庭内の省エネ行動は以下の3つに分類できる可能性が示された。

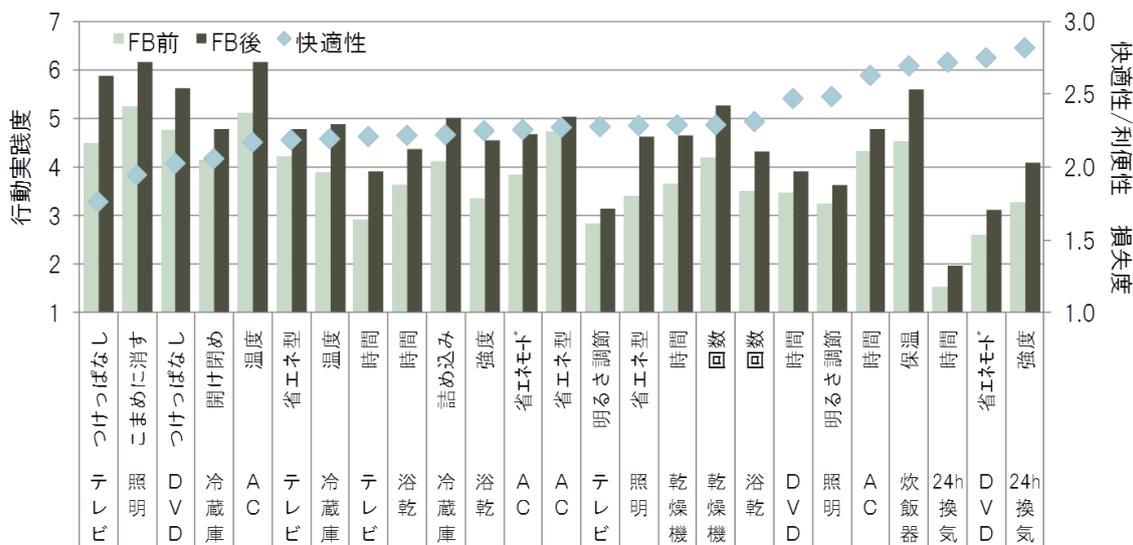


図 15 省エネ行動実践度および快適性/利便性の損失度

#### 【情報フィードバック（見える化）で省エネ可能】

テレビをつけっぱなしにしない、照明をこまめに消す、DVDをつけっぱなしにしない、エアコンの温度調整、などの行動は既に各家庭での実践度は高く、快適性や利便性の損失度も低い。これらの行動は、生活者は普段から実践している可能性も高く、エネルギーマネジメントシステムによる制御も可能であるのみならず、エネルギー消費量のフィードバックのみで、実践度が高まる可能性がある行動であるといえる。

#### 【エネマネで省エネ可能】

冷蔵庫の温度調節、テレビの視聴時間を短縮する、浴室乾燥機の強度を弱める、エアコンの省エネモードの利用、テレビの明るさ調節、乾燥機の利用時間や回数を減らす、などの行動は、実践度が低いものの、快適性や利便性の低下はあまり生じていない。これらの省エネ行動については、生活者が実践していないだけで、分散エネルギーマネジメントシステムを導入して、省エネ制御を行うことにより快適性や利便性が損なわれる可能性は低い。

#### 【省エネ不可能】

DVDの利用時間短縮、照明の明るさ調節、エアコンの利用時間短縮、24時間換気の強度調節や利用時間短縮、DVDの省エネモードの利用、などの省エネ行動は、行動実践度も低く、快適性や利便性の損失度も高い。これらの行動については、省エネすることによって生活者の快適性や利便性が阻害される可能性が高く、分散エネルギーマネジメントシステムを導入した場合には、不満感が高まる可能性がある。たとえば、DVDの省エネモードを利用した場合、「起動までに時間がかかるので嫌だ」「小さい子供がいるので、エアコンをつけないのは難しい」などである。

本調査結果からは、家庭内において利便性・快適性を損なわない省エネ余地は少なからずあるものの、実際に省エネ制御をすると、不快さ、不便さを生じさせてしまう行動は存在することが明らかになった。最もくつろぐことのできる家庭内において、不快さ、不便さを伴うことは、生活者としては許容しがたいものであり、分散エネルギーマネジメントシステム普及の阻害要因ともなりかねない。今後は、不快さ、不便さを伴う省エネ行動についての検討が重要であると考えらる。

(2) 家庭内機器最適運転計画モデルの開発と家庭内機器制御による効果の評価

1) 家庭内機器最適運転計画モデルの開発

ここでは、図1の左下の分散エネルギーマネジメントシステムの開発を目指し、同システムを用いた需要の能動化による電力システム全体での需給バランス調整力の評価を行うためのツールとして、混合整数線形計画法を用いた家庭内機器最適運転計画モデルを開発した。時間解像度は1時間で、分散電源としてPVシステムを、蓄エネルギー装置としてヒートポンプ (Heat Pump: 以下、HP) 給湯機、貯湯槽、蓄電池を扱い、また、省エネ給湯器としてHP給湯機と並列利用可能な太陽熱集熱器を制御対象機器とし、1時間単位の電力および給湯需要量、PV発電量、給湯温度、外気温度、電力価格、機器性能データを入力データとして、家庭内電気料金が最も安くなる運転方法を決定することとした。対象とした機器および考慮するエネルギーフローを図16に示す。

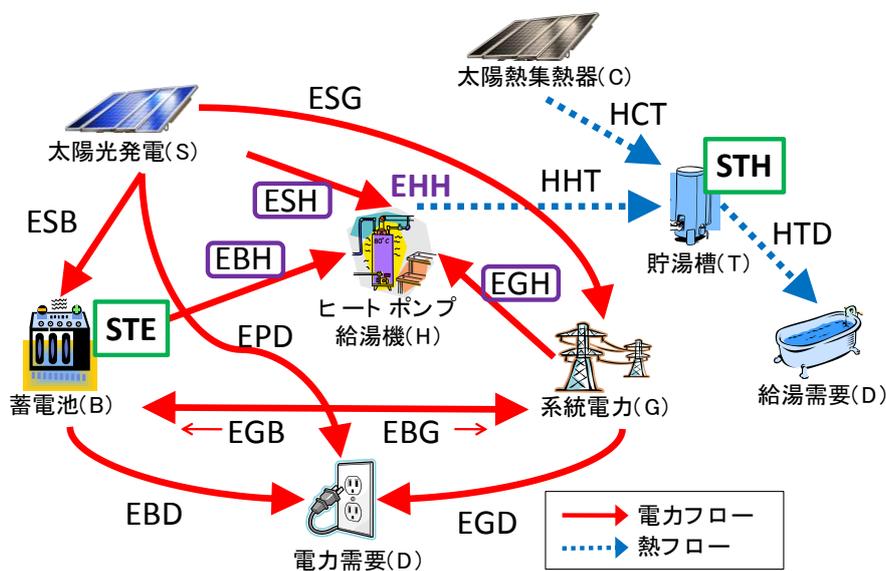


図16 対象機器と考慮するエネルギーフロー

開発したモデルを定式化したものを以下に示す。

【目的関数】

$$\text{minimize: } \sum_t prb_t \cdot (EGB_t + EGH_t + EGD_t) - \sum_t prs_t \cdot (ESG_t + EBG_t) \dots(1)$$

【制約条件】

$$ESB_t + ESH_t + ESD_t + ESG_t = gpv_t \dots(2)$$

$$HST_t \leq shg_t \dots(3)$$

$$ESD_t + EBD_t + EGD_t = dme_t \dots(4)$$

$$HTD_t = dmh_t \dots(5)$$

$$EGB_t + EGH_t + EGD_t \leq cpg_{io} \dots(6)$$

$$ESB_t + EGB_t \leq cpb_{io} \dots(7)$$

$$EBH_t + EBD_t + EBG_t \leq cpb_{io} \dots(8)$$

$$r_1 \cdot cpb_{en} \leq STE_t \leq cpb_{en} \dots(9)$$

$$STE_t - STE_{t-1} = (1 - lsb) \cdot (ESB_t + EGB_t) - (EBH_t + EBD_t + EBG_t) \dots(10)$$

$$r_2 \cdot cph_{io} \cdot OPI_t \leq HHT_t \leq cph_{io} \cdot OPI_t \dots(11)$$

$$OPI_t - OPI_{t-1} = OPN_t - OPF_t \dots\dots\dots(12)$$

$$OPN_t \leq OPI_t \dots\dots\dots(13)$$

$$OPF_t \leq 1 - OPI_t \dots\dots\dots(14)$$

$$HHT_t - HHT_{t-1} = OHU_t - OHD_t \dots\dots\dots(15)$$

$$OHU_t \leq cph_{io} \cdot OPI_t \dots\dots\dots(16)$$

$$OHD_t = cph_{io} \cdot OPF_t \dots\dots\dots(17)$$

$$OHU_t + OHU_{t-1} \geq cph_{io} \cdot OPN_{t-1} \dots\dots\dots(18)$$

$$HHH_t = r_3 \cdot cph_{io} \cdot OPN_t \dots\dots\dots(19)$$

$$r_4 \cdot cpt_{en} \leq STE_t \leq cpt_{en} \dots\dots\dots(20)$$

$$STH_t - (1 - lst) \cdot STH_{t-1} = HHT_t + HCT_t - HTD_t \dots\dots\dots(21)$$

$$STH_{t-1} \geq HTD_t \dots\dots\dots(22)$$

$$3.6 \cdot cop_t \cdot (ESH_t + EBH_t + EGH_t - xhp \cdot OPI_t) \\ = HHT_t + HHH_t \dots\dots\dots(23)$$

$$STE_0 = STE_{hr} \dots\dots\dots(24)$$

$$STH_0 = STH_{hr} \dots\dots\dots(25)$$

$$HHT_0 = HHT_{hr} \dots\dots\dots(26)$$

$$OPI_0 = OPI_{hr} \dots\dots\dots(27)$$

$$OHU_0 = OHU_{hr} \dots\dots\dots(28)$$

$$OPN_0 = OPN_{hr} \dots\dots\dots(29)$$

( $t = 1, 2, \dots, hr$ ) (All variables are  $\geq 0$ )

$prb$ : 買電価格[¥/kWh]、 $prs$ : 売電価格[¥/kWh]、 $gpv$ : PV 発電量[kWh]、 $dme$ : 電力需要量[kWh]、  
 $dmh$ : 給湯需要量[MJ]、 $cp_{gio}$ : 買電量上限[kWh]、 $cp_{bio}$ : 充放電容量×1h [kWh]、 $cp_{ben}$ : 蓄電容量[kWh]、  
 $cpt_{en}$ : 貯湯容量[MJ]、 $cph_{io}$ : HP 定格加熱能力×1h [MJ]、 $lsb$ : 蓄電池充放電時ロス率、 $lst$ : 貯湯槽放熱ロス率、  
 $cop$ : HP の成績係数、 $xhp$ : HP 補機消費電力量[kWh]、 $r_1$ : 最低蓄電量維持率 0.2、 $r_2$ : 最低製造熱率 1/60、  
 $r_3$ : HP 起動時ロス率 0.05、 $r_4$ : 最低蓄熱率維持率 0.1。  
 $E [X][Y]^*$ : [X]から[Y]への電力量[kWh]、 $H [X][Y]^*$ : [X]から[Y]への温熱量[MJ]、  
 $HHH$ : HP 給湯機運転開始時エネルギーロス[MJ]、 $STE$ : 蓄電量[kWh]、 $STH$ : 蓄熱量[MJ]、  
 $OPI$ : HP 給湯機運転指標 (0 または 1 のバイナリ変数)、 $OPN$ : 運転開始指標、 $OPF$ : 運転停止指標、  
 $OHU$ : 製造熱増加量[MJ]、 $OHD$ : 製造熱減少量[MJ]。  
 ※[X]、[Y]は、 $G$ : 電力系統、 $S$ : PV システム、 $D$ : 需要、 $B$ : 蓄電池、 $H$ : HP 給湯機、 $T$ : 貯湯槽、を表す。

## 2) 現行の電気料金制度におけるHP給湯機の最適運転の効果

昼間のピーク時の電気料金単価が高く、深夜早朝の単価が安い、現行の季節別時間帯別の電気料金制度の条件のもと、PVシステム、HP給湯機、貯湯槽のみが設置されたシステムにおいて、家庭内機器の最適運転計画モデルを適用した。計算対象期間を中間期2003年5月1日～14日、夏期2003年8月1日～14日、冬期2004年1月1日～14日の各期2週間とし、関東地域のある戸建住宅を対象として計算を行った。気象データやPV発電量データは、当該日の東京のデータを用い、需要データ等は戸建住宅の実測データをもとに設定した。

給湯需要予測による過剰沸き上げ防止効果を定量的に評価するため、夜間の安い電力を用いて早朝7時に貯湯槽を満蓄状態にする運転をケース1、給湯需要量に合わせて必要量だけ沸き上げる運転をケース2とし、家庭内の電気料金を最小にする運転を行った際の省エネ効果について比較分析を行った。給湯需要量の多い冬期の計算結果より、典型的な4日間の結果を図17に示す。

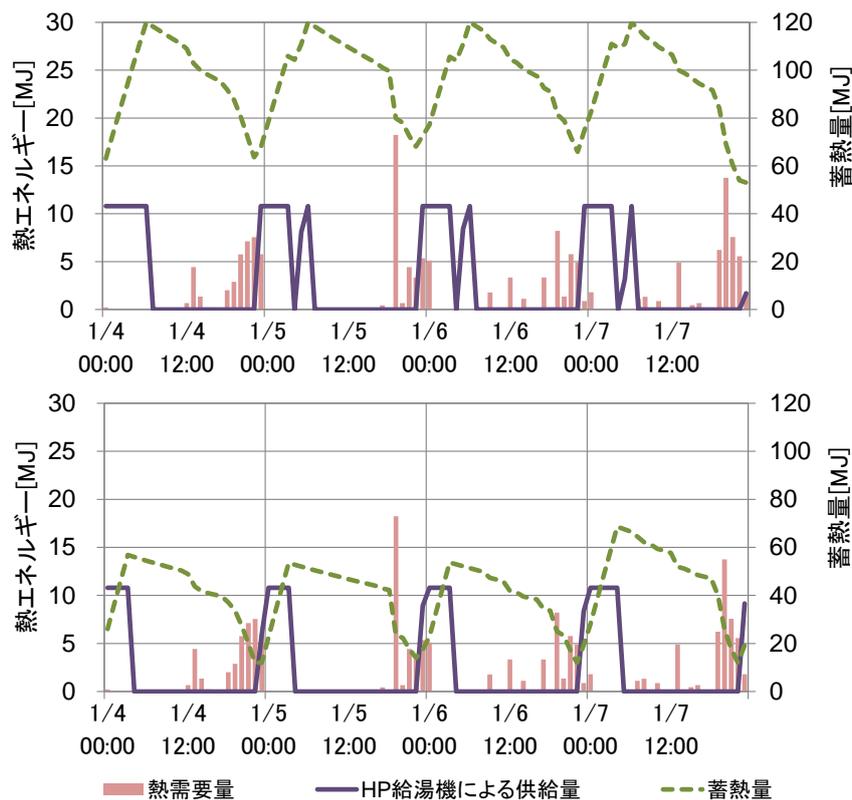


図 1 7 現行電気料金での最適運転（上：ケース1、下：ケース2）

最適運転結果より、ケース1では、7時に満蓄状態にするために早朝にもHP給湯機を運転しているが、ケース2では早朝には運転を行わず、どちらの場合も基本的には早朝よりも深夜に優先的に運転が行われることが分かった。運転開始時刻を調節することにより朝7時に沸き上がりとなる現在のHP給湯機の設定に多く見られる運転方法とは大きく異なることが分かった。早めにお湯を沸かすことによる貯湯槽からの放熱ロスの影響を考慮しても、早朝より外気温がやや高い深夜に運転を行う方がHP給湯機の効率が高く、省エネ性および電気料金の点で有利であるということである。現在の運転方法は、電力システム負荷が最も小さくなる早朝に負荷を誘導するという点においては適しているといえるが、省エネ性、家庭における経済性の観点からは、深夜の運転の方が良いことが分かった。

ケース1とケース2の結果を比較するため、表3に各期のHP給湯機の電力消費量と貯湯槽からの放熱ロス量を示す。需要量の予測を用いるケース2では年間を通して大きな省エネ効果が期待できることが確認できた。給湯需要量の予測を精度良く行うことの重要性を示すことができた。

表 3 現行電気料金での最適運転時のHP給湯機の電力消費量および貯湯槽からの放熱ロス

		HP給湯機の 電力消費量[kWh]	貯湯槽からの 放熱ロス[MJ]
中間期	ケース1	34.8	205.1
	ケース2	26.5	97.0
夏期	ケース1	17.8	178.5
	ケース2	10.4	52.9
冬期	ケース1	122.0	508.7
	ケース2	80.2	214.0

### 3) 変動電気料金制度による需要の能動化

電力需要を増やしたい時間帯に電気料金を安く、電力需要を減らしたい時間帯に電気料金を高くする変動する電気料金を用いることで、間接的に需要を調整することができる。変動する電気料金を用いて、需給バランス調整に家庭内の機器を利用することを想定し、PVシステム、HP給湯機、貯湯槽、蓄電池が設置されたシステムにおいて家庭内機器最適運転計画モデルを適用した。

中間期2003年5月1日～14日、夏期2003年8月1日～14日、冬期2004年1月1日～14日の各期2週間を計算対象期間とし、同様に関東地域のある戸建住宅を対象として計算を行った。

変動する電気料金については、サブテーマ4の結果より、PVシステム未導入時の各時刻の系統側発電機の限界燃料費をもとに作成した電気料金（V0）と、PVシステム大量導入を想定した場合の各時刻の系統側発電機の限界燃料費をもとに作成した電気料金（V1）の場合で計算を行い、さらに、V0とV1の価格差を2倍、3倍に拡大した価格（V2、V3）でも計算を行い、価格設定による機器の運転時刻の違いについて分析を行った。価格の例を図18に示す。

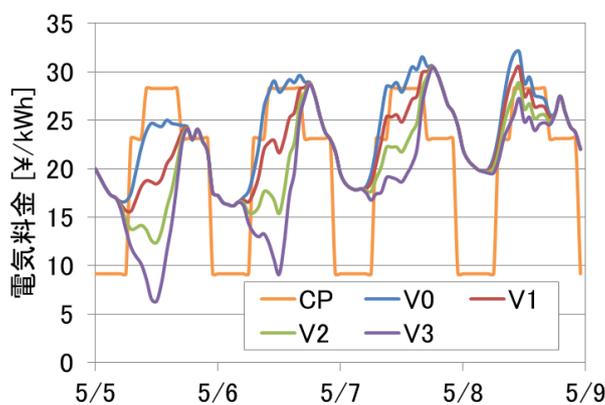


図18 5月の4日間の変動電気料金の設定例  
(CP：現行電気料金、V0～V3：変動電気料金)

最適運転の計算結果より、価格V2の場合の5月の4日間の最適運転の様子を図19に示す。良く晴れた日には、昼間にHP給湯機が運転され、PV余剰電力を減少させていることが分かる。また、曇天の4日目は、昼間の電気料金が余り安くないことから、系統側の負荷が最も小さくなる早朝にHP給湯機が運転されており、電力システム全体の需給バランス調整に貢献できていることが確認できる。また、蓄電池は最も価格の安い早朝に充電が行われ、晴天日には価格の高い夕方から夜間にかけて放電が行われており、曇天日には価格の高い昼間や夜の早い時間帯に放電されていた。

価格設定によるHP給湯機および蓄電池の運用方法を比較したものを図20および図21に示す。価格設定により、運転時間が異なっていることが見て取れる。家庭の機器による電力システム全体の需給バランス調整量を適切な量に設定するためには、適切な電気料金設定が存在していることが示された。

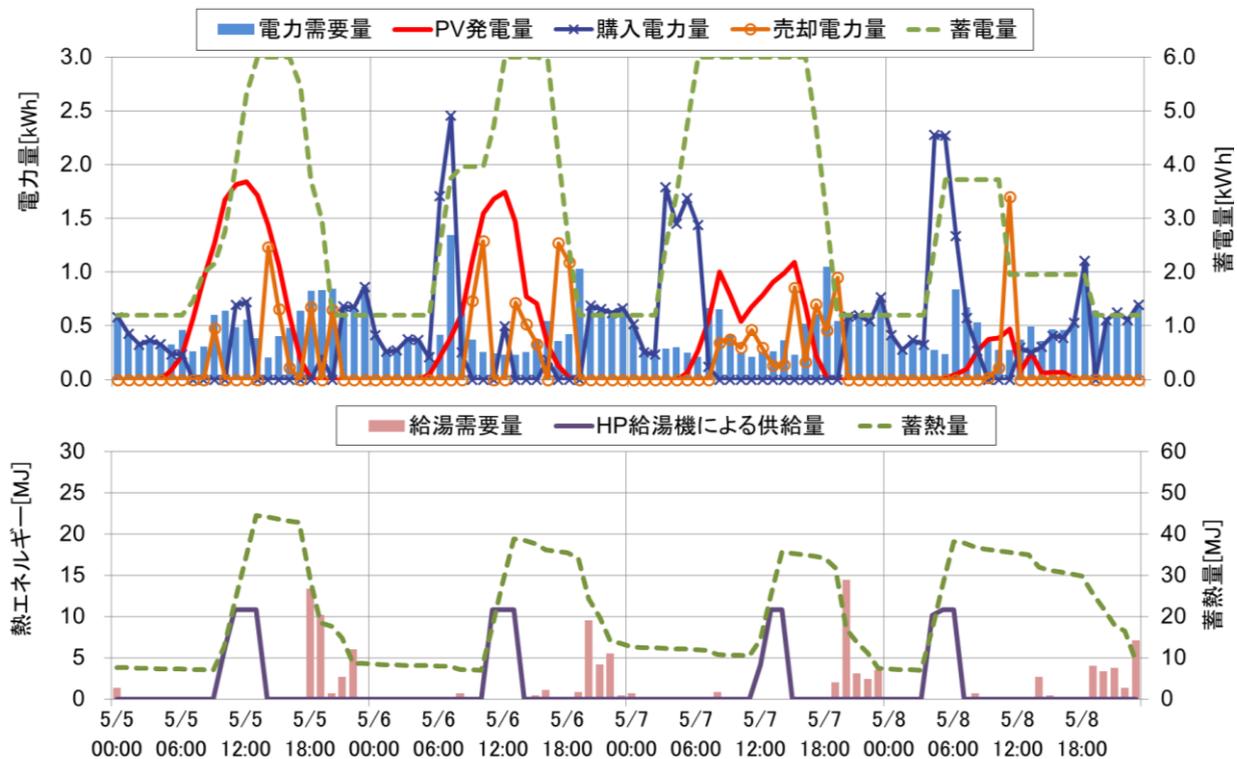


図 1 9 価格V2での5月の4日間の最適運転計算結果

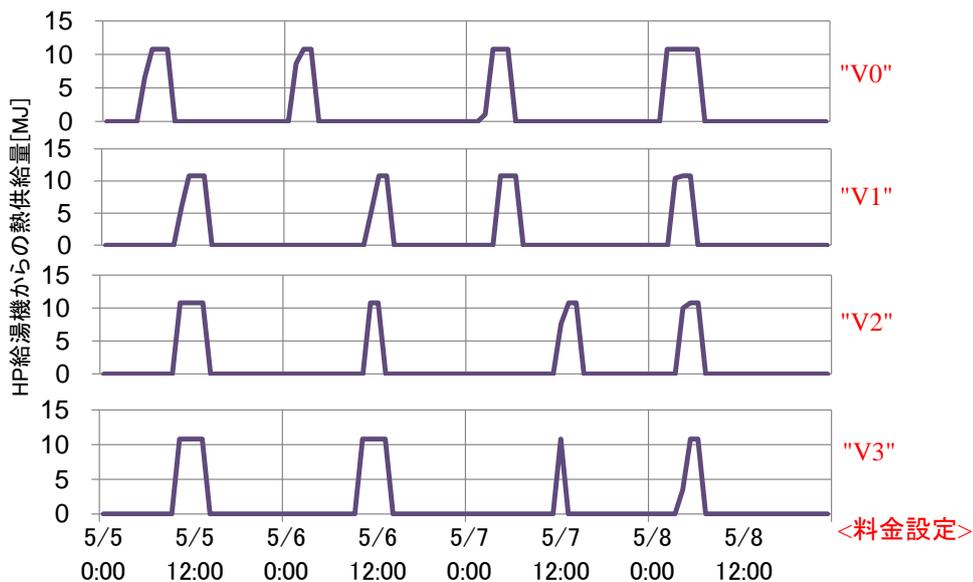


図 2 0 価格設定によるHP給湯機の運転時間の違い

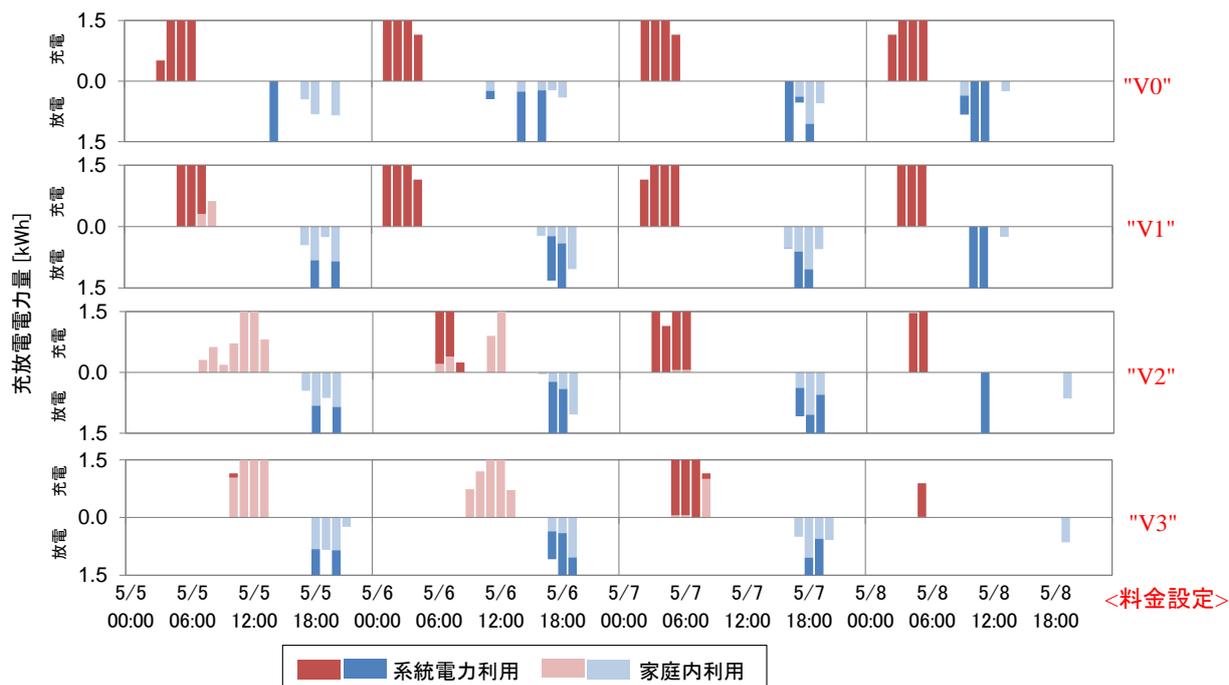


図 2 1 価格設定による蓄電池の充放電時間の違い

### (3) 建物エネルギーマネジメントシミュレーションモデルの開発

#### 1) 建物エネルギーマネジメントシステム

分散エネルギーマネジメントの検証のためには、対象となる住宅を詳細にモデル化し、機器の運転をシミュレーションする必要がある。PV、蓄電池、太陽熱給湯器など各種家庭内需要機器をそれぞれモデル化し、分散エネルギーマネジメントの検証を行った。住宅を構成する電力機器要素は以下のとおりとし、各住宅と電力系統との相互作用を検討するため瞬時値モデルを採用した。

<住宅を構成する電力機器要素>

- PVシステム ①チョップパ ②インバータ ③太陽電池
- 蓄電池システム
- 太陽熱給湯システム ①太陽熱給湯器 ②熱交換器 ③貯湯槽
- HP給湯機 ①整流器 ②インバータ ③誘導電動機
- エアコン ①整流器 ②インバータ ③誘導電動機

入力データとして、日射量、電気料金、HP給湯機起動スケジュール、蓄電池運転指令、電力需要、大気温度を用い、出力データとして、システム有効電力、システム無効電力、HP給湯機有効電力、HP給湯機無効電力、エアコン有効電力、エアコン無効電力、PVシステム発電量、蓄電池充放電量、バッテリーレベル、使用電気料金を得るシミュレーションモデルの開発を行った。

福岡市のデータを用いて2日間のシミュレーションを行った。計算結果として、図 2 2 に各機器の時刻別の有効電力の値を示す。これにより、モデルの妥当性を確認することができた。

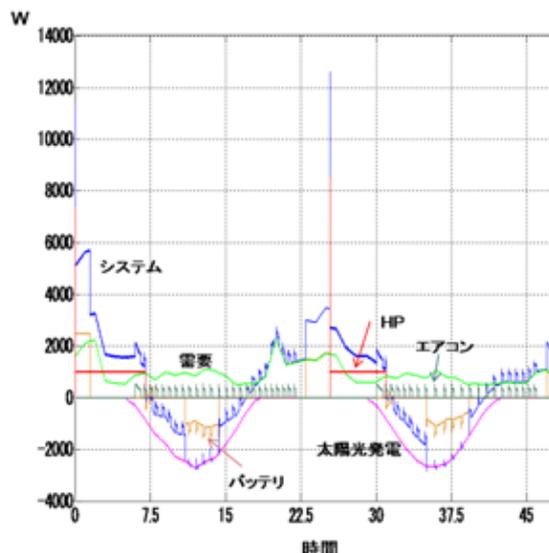


図 2 2 家庭内機器の有効電力の計算結果

次に、開発したモデルを利用してエネルギーマネジメント機能の検証を行った。例として、蓄電池の運用方法の違いによる家庭内使用電気料金について、電気料金は深夜に安く昼間に高い現行の時間帯別電気料金を用い、売電価格は買電価格より1円安いものとして計算して評価を行った。CASE-1は蓄電池を利用しない場合、CASE-2は深夜の系統電力およびPVによる余剰電力を蓄電池に充電し、電力不足時に直ちに放電を行う場合、CASE-3は深夜にのみ充電して電力不足時に放電し、PVによる余剰電力は売電する場合、CASE-4は動的計画法を用いて決定された家庭内の電気料金を最小にする蓄電池の充放電スケジュールに従った場合とし、4つのケースにおいて24時間のシミュレーションを行った。

各ケース24時間の積算電気料金および各時刻のバッテリーレベルを図 2 3 に示す。蓄電池を利用しない場合では238円と最も高く、また、PVからの余剰電力は充電するよりも売電した方が家計に良いという結果となった。動的計画法を用いて最適な運転スケジュールを決定した場合は、蓄電池を利用しない場合より40円安い結果となった。このように、家庭内の機器の運転方法を再現することにより、エネルギーマネジメント機能を検証することが可能となった。

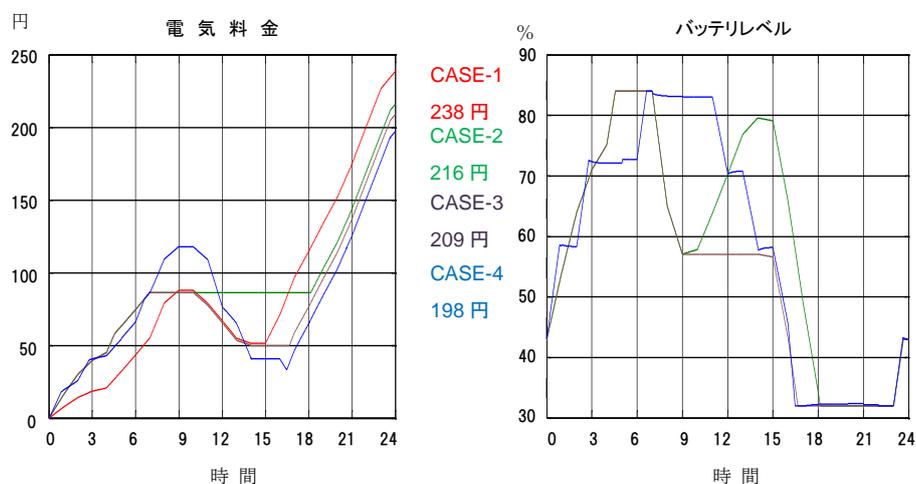


図 2 3 蓄電池の運用方法別の24時間の積算電気料金およびバッテリーレベル

2) 確率動的計画法による分散エネルギーマネジメントシステムモデルの開発  
家庭に実装する可能性を考慮したエネルギーマネジメント装置の開発に向けて、

- ハードウェアの制約を考慮した実装可能な制御方法
- 不確定な電力需要、給湯需要、PV発電量の下で、有効な制御方法

を満足するため確率動的計画法 (DP) による分散エネルギーマネジメントシステムモデルを開発した。エネルギーマネジメントシステムモデルの構成を図 2 4 に示す。

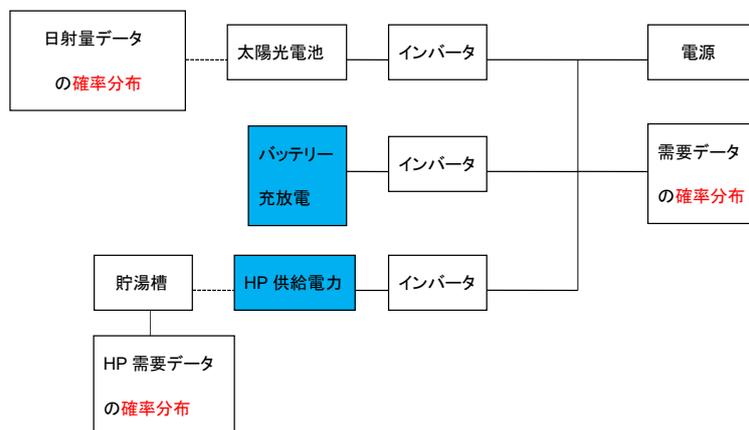


図 2 4 分散エネルギーマネジメントシステムモデルの構成

実際の分散エネルギーマネジメントシステムでは、需要データやPV発電量データ等是不確実性を含んだ予測値を利用することになる。確率動的計画法では、これらの予測データを確率的に扱うことが可能である。本モデルでは後退型動的計画アルゴリズムを用いた。以下に概要を述べる。

図 2 5 に示すように、時刻、バッテリーレベル、貯湯槽レベルを軸とする3次元格子を考え、この各格子点における評価値である電気料金の最小値を再帰式により計算した。

$$V_{t,m,n} = \min[C_{t,bt, hp} + V'_{t+1,p',q'}] \dots\dots\dots(30)$$

$$V_{hr,m,n} = \min[C_{hr,bt, hp}] \dots\dots\dots(31)$$

$$V'_{t+1,p',q'} = (1-r_1)(1-r_2) \cdot V_{t+1,p,q} + r_1(1-r_2) \cdot V_{t+1,p+1,q} \\ + (1-r_1)r_2 \cdot V_{t+1,p,q+1} + r_1r_2 \cdot V_{t+1,p+1,q+1} \dots\dots\dots(32) \\ (t = 1, 2, \dots, hr-1)$$

$V, V'$ : 格子点・格子外の点における評価値 (電気料金) [円]、 $C$ : 蓄電池・HP給湯機の運転による電気料金[円]。

時刻  $hr$  (計算対象範囲の最終時刻)、格子点  $(m,n)$  (バッテリーレベル  $m$ 、貯湯槽レベル  $n$ ) における評価値  $V_{hr,m,n}$  は、その時刻における蓄電池の充放電  $bt$ 、HP給湯機の運転  $hp$  を考慮した電気料金の最小値とする (式 (31))。時刻  $t$ 、格子点  $(m,n)$  における計算では、PV発電量  $pv$ 、電力需要量  $el$ 、給湯需要量  $hw$ 、蓄電池の充放電  $bt$  や HP 給湯機の運転  $hp$  により、充電時ロスや放熱ロス等を考慮することで時刻  $t+1$  において到達する点  $(p',q')$  を求め、この点における評価値を式 (30) によって計算する。評価値は格子点においてのみ算出されているため、格子外の点  $(p',q')$  における評価値  $V'_{t+1,p',q'}$  は、その点を囲む4つの格子点における評価値を2次元線形補間して算出する。これに電気料金を加えたものが評価値の候補となり、蓄電池とHP給湯機のすべての運転パターンのうち最小のものを時刻  $t$ 、格子点  $(m,n)$  の評価値とした。

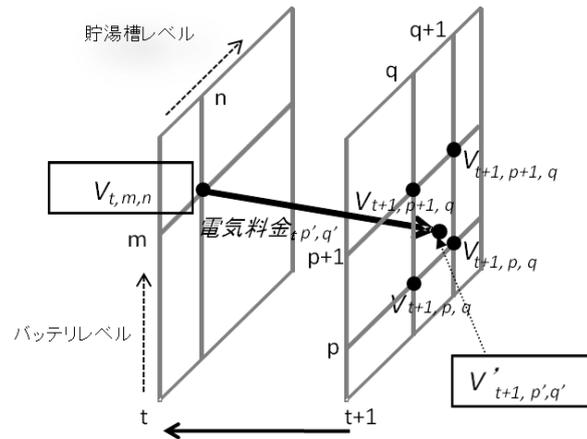


図 2 5 本モデル中の確率動的計画法の概要

PV発電量、電力需要量、給湯需要量が確率的に与えられる場合では、格子点  $(m,n)$  から格子点  $(p',q')$  への対応が、PV発電量が  $pv$ 、電力需要量が  $el$ 、給湯需要量が  $hw$  によって異なるので、各量における暫定的な評価値  $v_{t,m,n}(pv,el,hw)$  は式 (33) となり、PV発電量が  $pv$ 、電力需要量が  $el$ 、給湯需要量が  $hw$  となる確率をそれぞれ  $Pa(pv)$ 、 $Pb(el)$ 、 $Pc(hw)$  とすると、格子点における評価値は各量の確率を考慮して式 (34) により計算できる。さらに、PV発電量の予測データについて、発電量  $pv_i$  から発電量  $pv_j$  への状態遷移の確率が  $Pt(i,j)$  と与えられるとき、式 (35) によって暫定評価値を決定した。状態遷移確率を導入することにより、PV発電量の実際と異なる状態遷移が排除され、より現実性のある評価値を算出することができる。

$$v_{t,m,n}(pv,el,hw) = \min[C_{t,bt,hp} + V'_{t+1,p',q'}(pv,el,hw)] \dots\dots\dots(33)$$

$$V_{t,m,n} = \sum_{pv} \sum_{el} \sum_{hw} Pa(pv) \cdot Pb(el) \cdot Pc(hw) \cdot v_{t,m,n}(pv,el,hw) \dots\dots\dots(34)$$

$$v_{t,m,n}(pv_i,el,hw) = \min[C_{t,bt,hp} + \sum_j Pt(i,j) \cdot v'_{t+1,p',q'}(pv_j,el,hw)] \dots\dots\dots(35)$$

確率データの作成には、月の前半15日間のデータを基に作成し、後半16日の1時間ごとの格子点評価値を計算し、電気料金が最小となる蓄電池の充放電方法、HP給湯機の運転方法を求めた。

分析は、PV発電量、電力需要量、給湯需要量のすべてのデータを既知として扱った場合（神様運転ケース）、前半2週間の平均値をデータとして用いた場合（平均値利用ケース）、前半2週間のデータより確率分布を算出して用いた場合（確率利用（遷移性なし）ケース）、さらにPV発電量について遷移確率を導入した場合（確率利用（遷移性考慮）ケース）について計算を行い、蓄電池の容量設定による16日間の電気料金の比較を行った。結果を図 2 6 に示す。蓄電池の容量が大きくなるほど、また過去のPV発電量、電力需要量、給湯需要量を確率値として入力し、評価値を求める方法が、平均値を用いるケースより電気料金が安い運転方法を見つけることができることも分かった。

評価値のデータ格納に必要なメモリ容量は、確率利用（遷移性考慮）ケースの場合、他のケースの4倍（427.4kbyte）となるが、電気料金は最も安くなり、神様運転ケースに最も近づくことが確認できた。これにより、学習によるPV発電量の経時的変化（遷移確率）を考慮したモデルの有効性が確認できた。天候やPV発電量の予測精度や需要の不確実性が本手法の有効性を低下させる可能性はあるが、一定のコストとのトレードオフにより商用として製作可能であり、最近のスマート携帯端末によるインターフェース、クラウドコンピューティングによる解析も可能である。

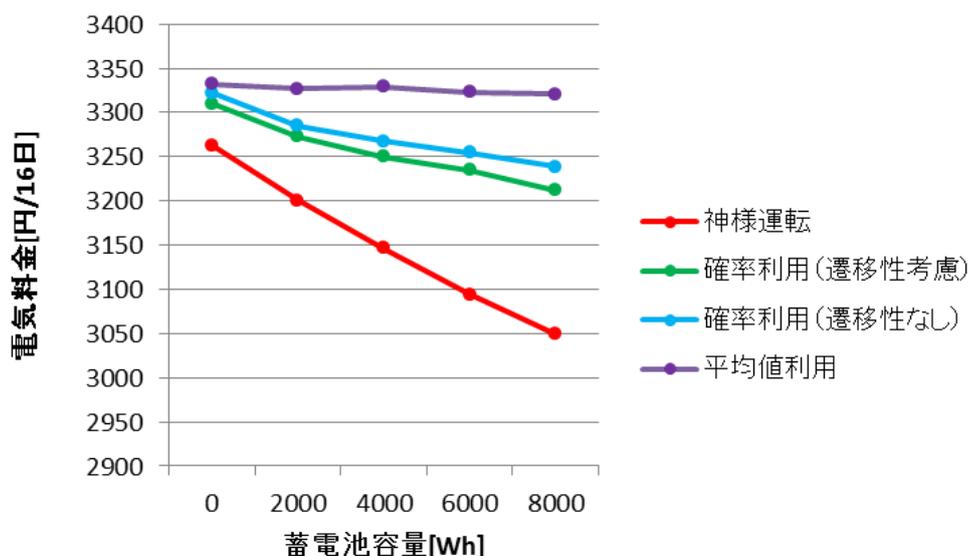


図 2 6 手法の違いによる電気料金の違い

#### (4) エネルギーマネジメント装置の試作およびシステム試験

##### 1) エネルギーマネジメント装置の試作・動作検証

PVシステムの出力変動補償、需要機器制御、エネルギー貯蔵装置制御などの機能を有する分散エネルギーマネジメント装置の試作を行った。試作したエネルギーマネジメント装置は、太陽電池で得られた電力を逆潮流によって系統に返すだけでなく、一部あるいは全部の電力を蓄電池に充電することや、時間帯によっては蓄電池に貯蔵された電力で家庭内の消費電力を賄うことなどを制御することができるものである。このような機能を実現するため、蓄電池や太陽電池シミュレータ、模擬需要等を用いて、これらの機器が接続された環境を模擬し、エネルギーマネジメントの動作が行えることの実証を目的とする装置の試作を行った。太陽電池の容量や取り扱う電力を1kWに抑えるなど、動作検証の目的から逸脱しない範囲で仮の仕様を表4のように決定し、図27に示すシステムを構築した。

表 4 エネルギーマネジメント装置プロトタイプ仕様

検討レベル	項目
基本仕様	・ 対応太陽電池容量：3.0kW 最大電力点追従（MPPT）制御機能付
	・ 蓄電池充電容量：1kW
	・ 蓄電池貯蔵容量：1.35kWh
機能	・ 太陽電池の系統への逆潮流と蓄電池への充電の自動切り替え
	・ 負荷量に応じた需要家機器への太陽電池、系統からの電力、蓄電池からの電力供給切り替え
	・ 系統供給電力制限時の負荷機器供給電力不足分の太陽電池出力電力、蓄電池電力自動供給
	・ 太陽電池発電量、逆潮流電力量、系統供給電力量モニター
	・ 需要家機器消費電力モニター

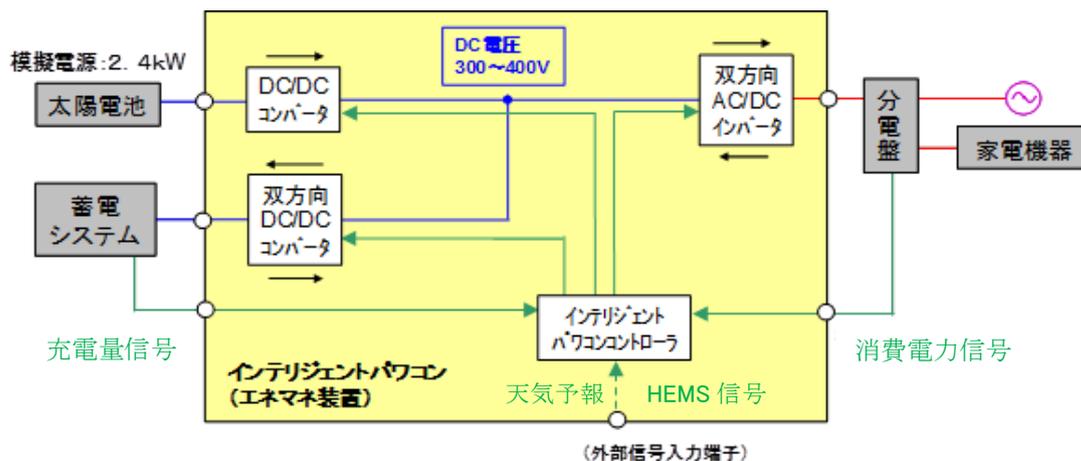


図 2 7 エネルギーマネジメント装置プロトタイプブロック図

蓄電池用のDC/DC変換器は双方向変換器となっており、充放電の切り替えのためには、変換動作に使用しているトランスに蓄積された磁気エネルギーをリセットしなければならない。そのため、変換には一定の時間が必要となる。また、太陽電池のみから負荷機器に電力を供給している状況で、HP給湯機の起動など、消費電力が急速に増加した場合に、蓄電池から電力供給を行なう場合も想定されている。蓄電池用のDC/DC変換器の起動特性が、高圧直流給電線の電圧の安定化に大きく影響を引き起こすため、蓄電池用DC/DC変換器の起動特性と、AC/DC変換器によるアシスト特性の評価を行った。結果を図 2 8 に示す。

蓄電池の充電状態から放電状態に切り替わるために、100ミリ秒程度の時間が必要となっている。しかし、高速な応答が可能なAC/DC変換器が切り替え時間中に電力を供給することにより、高圧直流給電線電圧が降下することなく、安定して電力を供給できていることが確認できた。

試作したエネルギーマネジメント装置と試験システムを用いて、その他各種の切り替え動作の確認を行った。その結果、懸念されたような制御の発振や、システム特性のカギを握るDC給電線電圧の大きな変動も見られず、正常に動作することが確認できた。



図 2 8 蓄電池を充電から放電に切り替えた時のDC給電線電圧変動の結果表示画面

## 2) 外部信号の取り込み

外部信号を電力設定料金情報とし、その情報に応じてエネルギーマネジメント装置が各家電機器を制御し、使用電力料金が想定内に収まることを確認した。具体的には、変動する料金設定に合わせて家電機器のタイムスケジュールを予め用意した。そのタイムスケジュールに合わせて、エネルギーマネジメント装置を使って家電を動かし、その時の電力波形、電力量を測定し、想定電気料金を算出した。試験システムの構成は図29の通りである。

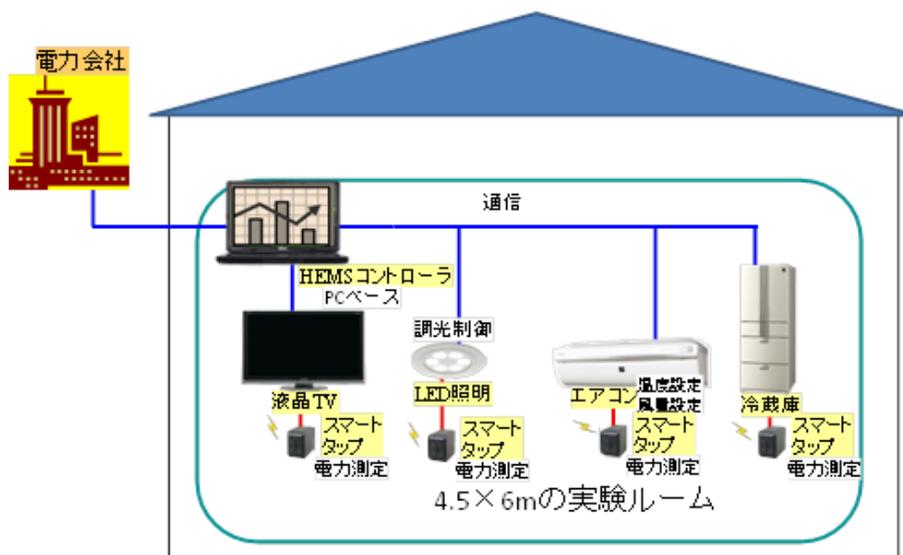


図29 エネルギーマネジメント装置制御試験システム構成図

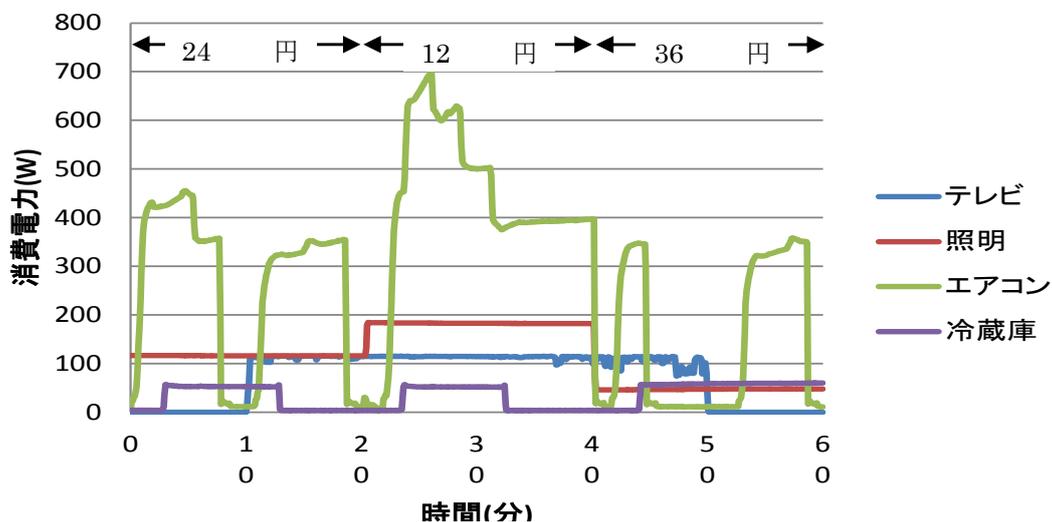


図30 エネルギーマネジメント装置による個別機器制御

20分単位で電力設定料金変動するとし、10分単位で家電機器制御を行った。通常の電力需要時を24円/kWhとし、系統電力が余り気味の時を12円/kWhとし、系統の電力がひっ迫している時を36円/kWhと想定した。図30に示すように電力料金が安くなると（20分～40分）消費電力が増加し、高くなると（40分～60分）消費電力が抑制されている。

次に系統からの電力抑制要求に応答する蓄電池付きパワーコンディショナシステムの安定性を確認した。電力事情が系統の要求としてHEMS (Home Energy Management System) コントローラーに送られ、エネルギーマネジメント装置がパワーコンディショナに買電電力抑制、売電電力抑制の指示を送る。図 3 1 に示すように、PVの逆潮流①、蓄電池とPVから負荷への電力供給②、PVと系統電力による蓄電池充電③の動作を確認し、パワーコンディショナが問題なく動作することを確認した。

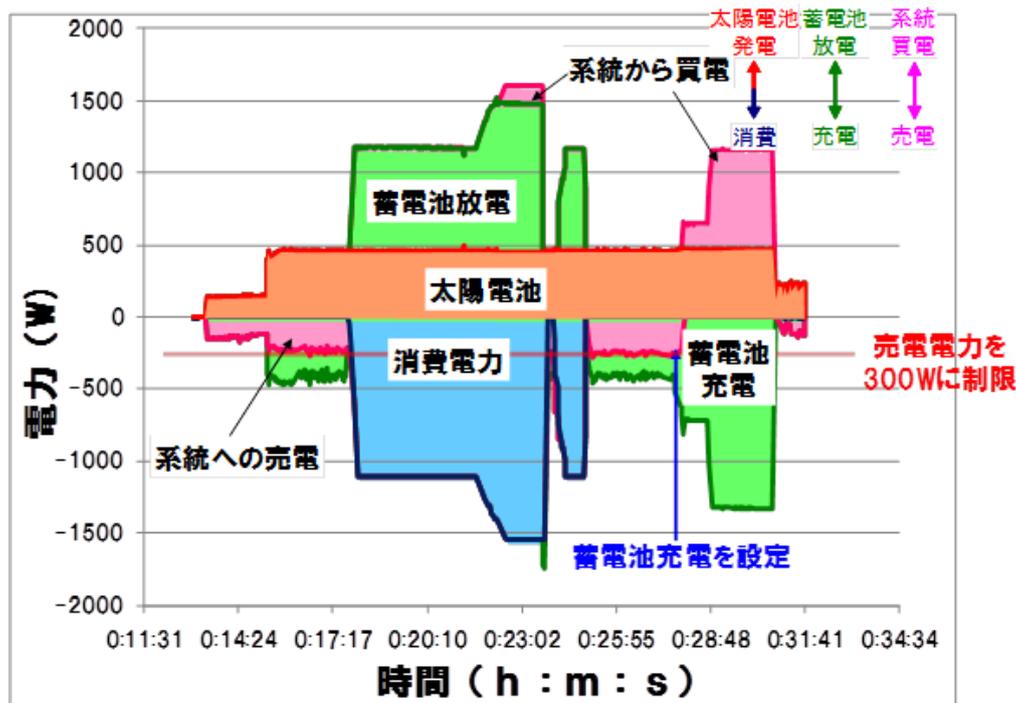


図 3 1 パワーコンディショナの基本動作確認

#### (5) まとめ・結論

本研究では、PVシステムや風力発電など不規則な変動を有する電源が大量に導入された場合に想定される電力システムの需給バランス調整の困難化の問題に対して、電力供給地域全体を扱う集中エネルギーマネジメントと協調した、住宅やオフィスビルなどの建物における分散エネルギーマネジメントシステムの開発を目指し、エネルギーサービス需要量を予測するための住宅内エネルギー需要構造解析手法の検討、分散エネルギーマネジメント導入効果の評価、および、エネルギーマネジメント装置の試作を行った。分電盤回路別の電流計測データを用いた住宅内のエネルギー構造解析手法について、自己組織化マップを用いた手法の検討を行った。その結果、回路に接続されている機器が少ない場合は、機器別に電流消費量が推計できることが分かった。今後のエネルギーサービス需要量の予測技術開発に向けて、実現性の高い計測と組み合わせた有用な解析手法を示すことができた。また、分散エネルギーマネジメントシステムによる家庭内機器制御を最適化およびシミュレーションにより検証するモデルを開発し、導入時の影響・効果について検討を行った。その結果、電力料金等の制度との組み合わせによって、需要家においてもメリットを享受しつつ、電力システム全体に貢献できることを示すことができた。さらに、エネルギーマネジメント装置の試作を行い、PVシステム、蓄電池、需要を模擬するシステムを構築し、基

本的な制御に関する試験を行った。懸念されたような制御の不安定性や、システム特性のカギを握る給電線電圧の大きな変動も見られず、正常に動作することが確認でき、分散エネルギーマネジメント装置の実用レベルでの安価な製造について、技術的な見通しを得ることができた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

既存住宅におけるエネルギー・温熱環境計測システムを開発し、分電盤回路別1分値などの需要データを、LAN回線を通して収集する環境を構築し、家庭の需要構造を分析する技術を開発した。また、需要や電力価格が与えられた場合のPV、太陽熱集熱器、蓄電池、HP給湯機、貯湯槽等の最適運用方策を決定する家庭内機器運転計画モデルを作成した。本モデルにより、様々な機器の組み合わせにおける実運用の目安となる最適な分散エネルギーマネジメントが得られることとなった。さらに、エネルギーマネジメント装置のプロトタイプを試作し、蓄電池や太陽電池シミュレータ、模擬需要等を用いて、これらの機器が接続された環境を模擬し、分散エネルギーマネジメント装置の実用化の見通しを得た。

### (2) 環境政策への貢献

PVや風力発電等の出力が不安定な低炭素分散電源を大規模に導入するには、電力システム全体の需給バランス調整という観点から、家庭等の需要を能動化する分散エネルギーマネジメント装置が必要不可欠である。本研究は、将来、低コストでこの機能を有する装置を家庭に大量に普及させるための基礎的研究であり、PVの高い導入目標の実現を後押しする技術としての貢献が今後期待される。

## 6. 引用文献

- 1) 荻本和彦：「低炭素社会における電力システム」, 電気学会誌, Vol. 129, No. 1, 16-19 (2009)

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Takashi Ikegami, Yumiko Iwafune, Kazuhiko Ogimoto: "Optimum Operation Scheduling Model of Domestic Electric Appliances for Balancing Power Supply and Demand", Proceedings of 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON2010), 1-8, DOI: 10.1109/POWERCON.2010.5666592 (2010)
- 2) Kei Inoue, Yumiko Iwafune: "Operation of Heat Pump Water Heaters for Restriction of Photovoltaic Reverse Power Flow", Proceedings of 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON2010), 1-7, DOI: 10.1109/POWERCON.2010.5666074 (2010)
- 3) Yumiko Iwafune, Yoshie Yagita, Kazuhiko Ogimoto: "Estimation of Appliance Electricity

- Consumption by Monitoring Currents on Residential Distribution Boards”, Proceedings of 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON2010), 1-6, DOI: 10.1109/POWERCON.2010.5666076 (2010)
- 4) 池上貴志, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力需給調整力確保に向けた家庭内機器最適運転計画モデルの開発」, 電気学会論文誌B, Vol.130, No.10, 877-887 (2010)
  - 5) 岩船由美子: 「住宅用分電盤電流データを用いた機器稼働状況推定手法」, 電気学会論文誌B, Vol.131, No.7 (2011) (in press)
- <その他誌上発表(査読なし)>
- 1) 岩船由美子, 八木田克英: 「住宅用分電盤実測データに基づく機器別電力消費量推計方法」, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, No.13-2, 1-4 (2010)
  - 2) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力料金設定による家庭内電気機器の最適運用計画」, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, No.13-4, 1-4 (2010)
  - 3) 井上敬, 岩船由美子: 「太陽光発電出力の平準化を目的とした家庭用ヒートポンプ式給湯機の運用に関する検討」, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, No.20-3, 1-4 (2010)
  - 4) 片岡和人, 池上貴志, 荻本和彦: 「家庭内需要機器シミュレーション」, 平成22年電気学会全国大会講演論文集, No.6-027, 47-48 (2010)
  - 5) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力料金設定に応じた家庭内機器の最適運用による逆潮流抑制効果の評価」, 平成22年電気学会全国大会講演論文集, No.6-029, 51-52 (2010)
  - 6) 井上敬, 岩船由美子: 「需要の違いを考慮した家庭用ヒートポンプ式給湯機の運用と太陽光発電出力の平準化」, 平成22年電気学会全国大会講演論文集, No.6-036, 64-65 (2010)
  - 7) 岩船由美子, 八木田克英, 荻本和彦: 「分電盤データを用いた住宅内電力需要構造の把握ーエネルギー実測調査の概要ー」, 平成22年電気学会全国大会講演論文集, No.6-044, 76-77 (2010)
  - 8) Takashi Ikegami, Kazuto Kataoka, Yumiko Iwafune, Kazuhiko Ogimoto: “A Study on the Home Energy Management System for Blancing Power Demand and Supply under the Large PV Penetration”, Proceedings of Renewable Energy 2010, 0-Ps-4-8 (2010)
  - 9) Kei Inoue, Yumiko Iwafune: “Study on Operation of Heat Pump Water Heater for Leveling of Photovoltaic Output”, Proceedings of Renewable Energy 2010, 0-Ps-3-6 (2010)
  - 10) 八木田克英: 「消費者心理からみた見える化の可能性ーパーソナルインタビューからの示唆ー」, 日本エネルギー学会誌, Vol.89, No.7, 639-648 (2010)
  - 11) 八木田克英, 岩船由美子: 「省エネ行動におけるコミュニケーションのための質的研究ー家庭用エネルギー診断による検討ー」, 第19回日本エネルギー学会大会講演要旨集, 314-315 (2010)
  - 12) 岩船由美子, 荻本和彦, 八木田克英: 「宅用分電盤データを用いた機器別電力需要推計手法の提案」, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 166, 12\_13-12\_14 (2010)
  - 13) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「太陽熱集熱器とヒートポンプ給湯機を併用

- した住宅における需要能動化による電力需給バランス調整力の評価」, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 189, 19\_7-19\_8 (2010)
- 14) 片岡和人, 池上貴志, 岩船由美子, 荻本和彦, 土谷高文: 「需要能動化のための運用の不確定性を考慮した家庭用電気機器最適スケジューリングモデルの開発」, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 210, 22\_5-22\_6 (2010)
- 15) Takashi Ikegami, Kazuto Kataoka, Yumiko Iwafune, Kazuhiko Ogimoto: “The Home Energy Management System for Balancing Power Demand and Supply under the Large Photovoltaic Penetration”, Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) / the 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), 5102-5104 (2010)
- 16) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力需給バランス制御に貢献する家庭内機器最適運転モデルの評価」, 電気学会研究会資料, 電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-10-185, PSE-10-184, 119-124 (2010)
- 17) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力需給バランス調整のためのヒートポンプ給湯機最適運用に要求される給湯需要予測精度の評価」, 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, No.5-4, 67-70 (2011)
- 18) 岩船由美子, 八木田克英, 荻本和彦: 「自己組織化マップを用いた住宅用分電盤データの用途別推計」, 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, No.24-4, 399-402 (2011)
- 19) 八木田克英, 岩船由美子: 「エネルギー消費行動に影響を与える見える化要素の検討」, 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, No.30-4, 495-498 (2011)
- 20) 井上敬, 岩船由美子: 「ヒートポンプ式給湯機による太陽光発電逆潮流抑制効果－実測給湯需要の解析に基づく運用改良手法」, 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, No.31-2, 507-510 (2011)
- 21) 片岡和人, 池上貴志, 荻本和彦, 土谷高文: 「家庭内需要機器の確率的DP法による運用計画」, 平成23年電気学会全国大会講演論文集, No.6-126, 223-224 (2011)
- 22) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「家庭内の蓄電池とヒートポンプ給湯機による地域全体の電力需給調整力の評価」, 平成23年電気学会全国大会講演論文集, No.6-127, 225-226 (2011)

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 岩船由美子, 八木田克英: 「住宅用分電盤実測データに基づく機器別電力消費量推計方法」, エネルギー資源学会 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2010)
- 2) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力料金設定による家庭内電気機器の最適運用計画」, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2010)
- 3) 井上敬, 岩船由美子: 「太陽光発電出力の平準化を目的とした家庭用ヒートポンプ式給湯機の運用に関する検討」, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2010)
- 4) 片岡和人, 池上貴志, 岩船由美子, 荻本和彦: 「家庭内需要機器シミュレーション」, 平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010)

- 5) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力料金設定に応じた家庭内機器の最適運用による逆潮流抑制効果の評価」, 平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010)
- 6) 井上敬, 岩船由美子: 「需要の違いを考慮した家庭用ヒートポンプ式給湯機の運用と太陽光発電出力の平準化」, 平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010)
- 7) 岩船由美子, 八木田克英, 荻本和彦: 「分電盤データを用いた住宅内電力需要構造の把握ーエネルギー実測調査の概要ー」, 平成22年電気学会全国大会, 東京 (2010)
- 8) Takashi Ikegami, Kazuto Kataoka, Yumiko Iwafune, Kazuhiko Ogimoto: “A Study on the Home Energy Management System for Blancing Power Demand and Supply under the Large PV Penetration”, Renewable Energy 2010, Yokohama (2010)
- 9) Kei Inoue, Yumiko Iwafune: “Study on Operation of Heat Pump Water Heater for Leveling of Photovoltaic Output”, Renewable Energy 2010, Yokohama (2010)
- 10) 八木田克英, 岩船由美子: 「省エネ行動におけるコミュニケーションのための質的研究ー家庭用エネルギー診断による検討ー」, 第19回日本エネルギー学会大会, 東京 (2010)
- 11) 岩船由美子, 荻本和彦, 八木田克英: 「宅用分電盤データを用いた機器別電力需要推計手法の提案」, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会, 福岡市 (2010)
- 12) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「太陽熱集熱器とヒートポンプ給湯機を併用した住宅における需要能動化による電力需給バランス調整力の評価」, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会, 福岡市 (2010)
- 13) 片岡和人, 池上貴志, 岩船由美子, 荻本和彦, 土谷高文: 「需要能動化のための運用の不確定性を考慮した家庭用電気機器最適スケジューリングモデルの開発」, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会, 福岡市 (2010)
- 14) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力需給バランス制御に貢献する家庭内機器最適運転モデルの評価」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 東広島市 (2010)
- 15) Takashi Ikegami, Yumiko Iwafune, Kazuhiko Ogimoto: “Optimum Operation Scheduling Model of Domestic Electric Appliances for Balancing Power Supply and Demand”, 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON2010), Hangzou (2010)
- 16) Kei Inoue, Yumiko Iwafune: “Operation of Heat Pump Water Heaters for Restriction of Photovoltaic Reverse Power Flow”, 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON2010), Hangzou (2010)
- 17) Yumiko Iwafune, Yoshie Yagita, Kazuhiko Ogimoto: “Estimation of Appliance Electricity Consumption by Monitoring Currents on Residential Distribution Boards”, 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON2010), Hangzou (2010)
- 18) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦: 「電力需給バランス調整のためのヒートポンプ給湯機最適運用に要求される給湯需要予測精度の評価」, 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2011)
- 19) 岩船由美子, 八木田克英, 荻本和彦: 「自己組織化マップを用いた住宅用分電盤データの用途別推計」, 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2011)
- 20) 八木田克英, 岩船由美子: 「エネルギー消費行動に影響を与える見える化要素の検討」, 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2011)

- 21) 井上敬, 岩船由美子: 「ヒートポンプ式給湯機による太陽光発電逆潮流抑制効果—実測給湯需要の解析に基づく運用改良手法」, 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京 (2011)

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

- 1) 池上貴志: 「電力料金設定に応じた家庭内機器の最適運用による逆潮流抑制効果の評価」, 平成22年電気学会全国大会優秀論文発表賞 受賞 (2010年3月発表)
- 2) 池上貴志: 「電力需給バランス制御に貢献する家庭内機器最適運転モデルの評価」, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門研究会優秀論文発表賞 受賞 (2010年9月発表)