

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築  
のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」  
研究課題「「エネルギーの情報化」に基づく地域ナ  
ノグリッドの構築および実証」

## 研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成27年3月

研究代表者：加藤 丈和  
(京都大学 情報学研究科、  
特定准教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本プロジェクトでは、需要家内の自律的な電力管理システムを、需要家間で協調連携することにより、需要家間の電力融通を実現し、地域コミュニティの需給バランス制御、平準化を行うことを目的とし、(1) 加藤グループでは需要家内の自律的電力管理技術の研究・開発、(2) 久門グループでは需要家間協調連携による分散協調電力カラーリング技術の研究・開発、(3) 松山グループでは地域ナノグリッドにおける電力フローの平準化・安定化技術の研究・開発を行った。

具体的には、加藤グループで EoD とよぶ需要家向け電力管理システムを開発した。EoD では、電力消費機器を使用するまえに電力マネージャによって、電力使用計画や電力消費機器の優先度をもとに調停を行って、許可されたときのみ電力を使用することで、節電率や電力使用量の上限を保証するシステムである。また、EoD システムを複数電源のマネージメントにも拡張し、蓄電池の適応的制御を行うことで、500Wh の小型蓄電池で、生活の質を損なうことなく、ピーク電力を半減できることが確認できた。また、電力使用計画の策定や優先度の決定を自動的に行うために、家庭の電力使用パターンのみから生活者の生活行動（料理、休憩、など）を推定するアルゴリズムを開発した。工場向けには、生産機器の生産プロセスと電力使用パターンを解析し、電力使用ピークを最小化する生産プロセスを計算する計画アルゴリズムを開発し、実際の工場の電力使用パターン、生産プロセスをもとにしたシミュレーション実験によって有効性を確認した。また、実証実験として、一人暮らし向けのアパートに EoD システムを導入したスマートマンション、1戸建てで太陽光、蓄電池、ガスコジェネ発電機を備えた京エコハウスに導入したスマートハウスを構築し実際の生活シーンの電力使用パターンの蓄積、生活パターン解析、および EoD による電力制御の生活実験を行った。また、実際に操業中の2箇所の工場にシステムを導入し、電力使用パターンの解析、エアコン連携制御によるピーク電力削減を行った。

久門グループでは、電力ネットワークにおける電力の物理的特性を踏まえた安定な電力授受のために、エネルギーの送り手と受け手が常に協調してエネルギーを伝送するためのユニバーサルなモジュール（電力ルータ）の開発を行い、分散協調型で電力を安定に送信、受信するシステムを構築した。電力ルータは電力源、電圧源の切り替えや出力制御をソフトウェア的にシームレスに行うことができ、無線による通信によって互いに連携制御可能な双方向の AC-DC コンバータである。複数の電力ルータを電源、負荷に取り付け、互いに連携制御することで電力ネットワークの安定性を維持しつつ複数の小出力の電源から大負荷への電力供給、P2P の協調動作による特定の電源から特定の負荷への電力送信が実現できる。また、負荷と電源の電力ルータを完全に同期制御して電力を伝送する同期方式のほか、加藤グループとの連携によって、電力計測のみで制御できない負荷への伝送を実現する非同期方式のアルゴリズムも開発して、実際に動作可能なシステムとして展示、デモンストレーションを行った。今年度中にはエコハウスへの実装を行って家庭内での生活の中での利用を行う。

松山グループでは、EoD による自律的電力マネージメント機能を持つ需要家群で構成するコミュニティ内で、需要家同士の連携によってコミュニティ全体の需給バランス制御、平準化を行うアルゴリズムの開発を行った。既存のデマンドレスポンスの手法との違いは、(i) 各需要家が電力使用計画を立て、それをコミュニティの調整役であるコーディネータと調整することでコミュニティ全体の目的関数（需給バランス調整、平準化など）と各需要家の目的関数（QoL など）の双方を、電力使用計画のプロファイル以外の情報を公開せずに、最適化が可能な点と、(ii) 各需要家が加藤グループで開発した EoD システムによる自律的電力マネージメントを行うことで、自動的に各需要家の計画へのコミットメントを保証できる点にある。分散最適化の手法をもちいた前日計画の最適化、当日の各需要家の電力使用計画との差異を再調停する当日最適化、ま

たコミュニティを再帰的にサブグループに分割して全体を最適化する再帰型アルゴリズムの開発を行い、シミュレーションによりその有効性を確認した。また、加藤グループの実証フィールドで得た生活データを用いたシミュレーション実験を行い、今年度中には加藤グループの EoD システムにコミュニティ連携のインタフェースを実装して連携実験を行う。

このように本プロジェクトでは各グループで需要家内の電力制御システム、物理的に安定な需要家間電力融通のための電力カラーリングシステムの開発、需要家間連携によるコミュニティ需給バランス維持のための最適化アルゴリズムの開発に分担しながら連携して研究開発を実施した。

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

(先導的・独創的であり国際的に高く評価され、今後の科学技術に大きなインパクトを与える成果など)

### 1. EoD システム

概要: (200 字程度)

家電と電力マネージャの間の事前調停に基づく電力使用により、節電率を保証することのできる需要家向け電力管理システム。ユーザの家電使用状況に応じた動的優先度によって、生活状況にあわせて電力削減機器を選択することができる。成果として国際会議での発表だけでなく、報道発表も行ってマスメディアにも取り上げられ、また実際に生活実証、デモンストレーションも行い見学、取材対応も行っている。

### 2. 電力使用パターン解析アルゴリズム

概要: (200 字程度)

電気使用機器の電力使用パターンの解析により、使用家電の推定、電力変動のダイナミクスのモデル化、家電の使用状態の推定、異常検出、さらに生活者の生活行動推定や生活パターンの学習を行う解析アルゴリズムのシリーズ。

従来の電力変動パターン解析より、電流波形レベルまで含めた詳細な解析、生活者のパターン解析までおこなっており、それぞれの手法について論文採録、国際会議への採録がされている。電力変動ダイナミクスの解析では、優秀論文賞を受賞した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. 電力ルータ、および、分散協調型の電力カラーリング

概要: (200 字程度)

送り手と受け手が互いに協調した P2P エネルギー伝送が可能な電力ルータを 2 個の双方向 AC-DC コンバータモジュールとリチウムイオン蓄電池を組み合わせることにより実現した。これは無線通信の遅延を考慮した上で電力ルータ同士が互いに分散協調して電力フローを制御することにより、ロバストにミリ秒のスケールで電力授受の同時同量を可能にする電力ルータであり、サイバースystemと物理systemの協調設計により実現している。

また、この電力ルータを利用して、電力の送り手と受け手を特定して電力を送信することで、既存の電力網の上にピアトゥピアの専用線を仮想的に構築する電力カラーリングが実現できる可能性を持つ。実際にデモ展示として動作可能な状態まで実現し、エネルギーの情報化 WG におけるデモ展示では多くの参加者からの好評を得た。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ①「加藤」グループ

##### 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
加藤 丈和	京都大学 情報学研究科	特定准教授	H24.10～H27.3
高井 勇志	同上	特定助教	H25.4～H26.9
黒瀬 裕平	同上	M1～M2	H25.4～H27.3
松井 一弘	同上	M1	H26.4～H27.3
田村 健人	同上	M1～M2	H26.4～H26.3
田邨 優人	同上	M1～M2	H26.4～H26.3
張 信鵬	同上	特定研究員	H25.2～H26.3
Rodrigo Verschae	同上	特定研究員	H25.7～H26.3

##### 研究項目

- ・ オンデマンド型電力制御システム需要家内電力管理技術の研究・開発
- ・ 電力需給パターン, 生活行動パターンの学習とそれに基づく電力管理アルゴリズムの研究・開発
- ・ 家庭/オフィス/工場における需要家内電力管理システムの実証および評価

#### ②「松山」グループ

##### 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
松山 隆司	京都大学情報学研究科	教授	H24.10～H27.3
川嶋 宏彰	同上	講師	H24.10～H27.3
Rodrigo Verschae	同上	特定研究員	H26.4～H27.3

##### 研究項目

- ・ 需要家内における電力需給量の短期予測手法の開発
- ・ 需要家間の連携(事前計画調整・協調制御)アルゴリズムの考案

#### ③「久門」グループ

##### 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
久門 尚史	京都大学工学研究科	准教授	H24.10～
風岡 諒哉	同上	M2	H24.10～H25.3
深江 一志	同上	M2	H25.4～H26.3
枝川 卓也	同上	M2	H25.4～H27.3

##### 研究項目

- ・ 電源と負荷を協調させた電力フロー制御
- ・ 複数電源を協調させた電力フロー制御
- ・ テレゲンの定理に基づく電力フローのモデル化

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

主たる共同研究者である松山教授を主査として産学交流、情報交換の場として、エネルギー

の情報化WGを立ち上げプロジェクトの成果の情報共有や討論を継続して行っている。また、会員企業との協業として工場向けEMSの導入、実証も進めており、またシステムのライセンスングによるビジネスかの検討もおこなっている。

また、4社の民間企業と京都大学ないに共同研究講座を立ち上げ、本プロジェクトを含むエネルギーマネジメント技術の実用化、ビジネス化に取り組んでいる。

また、CREST FSの一環として加藤チーム、岩船チーム、依田チーム、東チームに加え、国内産学連携として、富士通株式会社、株式会社構造計画研究所、日東電工株式会社、日新電設株式会社、日本電気株式会社、ニチコン株式会社との検討を実施した。

また、通信ネットワーク、制御ネットワーク、M2M通信技術に関して、京都大学岡部寿男教授の研究グループ、守倉正博教授の研究グループ、慶応義塾大学山中直明教授の研究グループと検討した。さらに国際展開、国際標準化に関して、ドイツのフランフォーファ研究所、ベルギーのアントワープ大学、トヨタヨーロッパ、イギリスストラスクライド大学の研究グループとも検討した。

### § 3 研究実施内容及び成果

#### 3. 1 オンデマンド型電力制御に基づく需要家内電力管理および需要家間協調連携システムの構築(京都大学 加藤グループ)

##### (1)研究実施内容及び成果

加藤グループでは、需要家内の自律的電力管理システムの研究開発を中心に行った。従来の需要家向けEMS(HEMS/BEMS/FEMS)では、電力の見える化によるユーザ自身の努力に基づく電力削減、あるいはあらかじめ指定したタイマー制御による自動化、優先順位に基づく機器制御による電力削減が主であった。しかしユーザ自身の努力による節電ではその効果を保証することが難しく、また適切な時間に適切な電力使用量を決めることは難しい。さらにユーザのモチベーションを維持することも困難である。また一方でタイマー制御や事前に決めた優先度に基づく機器制御では、生活のなかで変化する電力使用パターンの変化に対応することが難しい。一方で社会的な情勢として、トータルの積算電力量を全体的に削減する省エネ、節電より、電力需給が逼迫しているときに電力を削減し、余剰があるときに電力を使用するといった、ピーク削減、ピークシフトなどの適切な電力管理が望まれている。我々のプロジェクトにおいても、電力需給を平準化、最適化することを目的としており、ユーザの様々な生活スタイル、業務プロセスに応じた適切な電力管理が必要となる。

これにたいして本研究では、需要家内の自律的な電力管理の仕組みとして、オンデマンド型電力制御(EoD)システムとよぶ新しい電力制御方式を開発し、家庭を対象として電力管理システムを構築した。これは全ての電気機器が電力使用前に電力マネージャに電力要求メッセージを送り、電力マネージャで調停を行ってから電力使用量を決定するシステムである。事前に調停をおこなってから電力を使用することで、事前に決めた電力使用の上限や節電率を保証することができ、またそのときの家電の使い方に応じて動的に決定する動的優先度によって、生活スタイルにあわせて電力を削減する機器を選択し、生活の質を維持しつつ電力を管理することが可能である。

また、本研究では需要家内の消費電力パターンの解析により、家電の動作や家電を使用する人物の行動を推定、学習する手法を検討した。これは家電ごとに設置した電力センサ(スマートタップ)によって得られる消費電力パターンのみから、家電の使用状態や、ユーザの動作、さらに生活行動(調理、睡眠、休憩など)を推定し、また各生活行動における家電の使用パターンを学習する手法である。カメラや位置センサなどの生活者のプライバシー

から受容し難い付加的なセンサを使用することなく、生活行動パターンが学習することができ、電力使用計画や優先度の決定に適用する。

以下では、EoD システムによる需要家向け電力制御システムについて(①)、また EoD を複数電源制御に拡張して需要家内の分散電源を管理するシステムについて(②)、電力消費パターンの解析による家電の見守りや人物行動を推定する手法について(③)、工場向け需要家内電力管理の取り組みについて(④)それぞれ説明する。

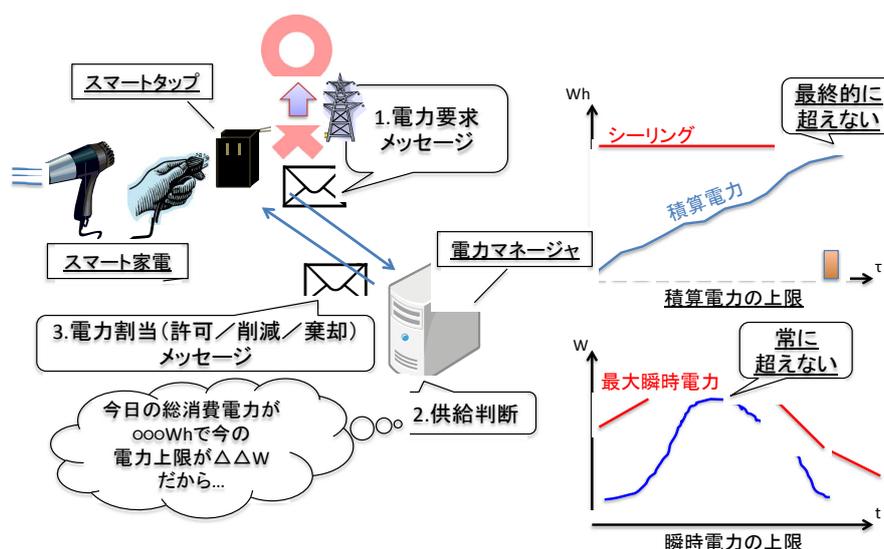


図 3.1.1. EoD システム概要

### ① EoD システムによる節電率保証型電力管理システム

EoD システムは図 3.1.1 に示すように、ネットワーク経由で制御可能なスマート電源と、それらを管理する電力マネージャから構成される。ここでは単一の電源(商用電源)のみを使用する場合における、家電の使用電力マネジメントについて述べる。

EoD の仕組みはスマート家電と電力マネージャ間のメッセージ交換による調停にもとづいて電力供給を行うことである。このようなメッセージを本研究では EoD プロトコルと呼ぶ。EoD プロトコルでは、ユーザがスマート家電の電源を入れたとき、すぐに電力が供給されるかわりに 1) スマート家電が、要求電力や優先度とともに電力要求メッセージを電力マネージャに送信する。2) 電力マネージャはその時の電力使用量や電源の供給可能電力、また家電の優先度に従って、家電への電力供給の可否や、供給電力を調停する。3) 電力マネージャは調停結果に従って電力割当(許可/削減/棄却)メッセージをスマート家電に送信する。4) 電力割当メッセージを受け取ったスマート家電は、メッセージに従って家電を動作させる。

商用電源を対象とした場合、通常、契約電力以内ならいくらかでも電力を使うことができるが、生活者自身が設定できるパラメータとして、瞬時電力に対する上限値(最大瞬時電力)と、積算電力量に対する上限値(シーリング)の二つの上限値を与える。最大瞬時電力は、生活者が契約電力を低く抑えるためや、電力網の需給バランスを保つための電力会社からのピーク抑制要請に答えるために時間帯ごとに使用電力の上限値として与える。また、シーリングは、生活者が電気代や Co2 排出量を抑えるために一定期間(一日、一週間、一ヶ月など)に使用する積算電力量の上限値として与える。これらのパラメータを商用電源に関する電源 QoEn (Quality of Energy)と呼ぶ。

つまり、EoD システムに要求される機能は、家庭内の電力を常に最大瞬時電力以下に保ちつつ、ユーザが決めた期間内の積算電力量を最終的にシーリング以下に抑えることである。また、ユーザの生活の質を維持するために、必要性の高い家電への電力要求はできるだ

け満たす必要がある。

生活の中での家電の重要性は、その使用パターンや使用状況によって変化する。そこで本研究では家電の使い方において変化する動的優先度を定義した。図 3.1.2.1に動的優先度の例を示す。まず家電の使い方のタイプ分けとして、家電の電力制御をどのように行えるかに注目し、(i)電力値を連続的に変化させることができる**電力制御可能家電**、(ii)電力要求を行ってから一定時間起動を待つことのできる**待機可能家電**、(iii)稼働中に一時停止ができる**一時停止可能家電**の3通りに分類した。

電力制御可能家電は、照明の明るさ制御のように使用電力を連続的に制御可能であり、要求した通りの電力が供給されるとユーザの満足度は最も高いが、供給電力が多少減少しても満足度は大きく変わらない。しかし、大幅に電力が減少すると家電の能力が制限されユーザの満足度は低下し、最終的にある一定以下の電力になると機能を果たせなくなるような家電である。このような家電に対しては、図 3.1.2.の a.に示すような使用電力に対して単調減少する優先度関数を定義した。

次に待機可能家電は、炊飯器や洗濯機のように、必要な時刻までに動作が完了していればよく稼働時期は電力要求時から遅らせることができ、一旦稼働したあとは使用電力パターンがきまっているような家電である。このような家電に対しては、図 3.1.2.の b.に示すように、電力要求時刻から時間経過とともに優先度が増加する優先度関数を定義した。

最後に一時停止可能家電は、エアコンなどのように、十分に部屋が温まって(冷えて)いれば、稼働中に短時間動作を停止してもユーザへの機能を損なうことがない家電である。このような家電には、図 3.1.2の c.のように、一旦停止したときは低い優先度で、その後家電の機能を損なわないうちに再稼働するように時間経過とともに優先度が上昇し、再稼働後は一定時間稼働状態を維持するために高い優先度をもって、また時間経過とともに優先度が低下するような優先度関数を定義した。

実際の家電では、これらの3通りの優先度関数の組み合わせで表現できる。実験では電力調節可能な家電として、TV(画面の明るさ)、照明、電力調節と待機可能な家電としてポット、一時停止可能と電力調節が可能な家電としてエアコン、一時停止のみが可能な家電として冷蔵庫などのように定義した。

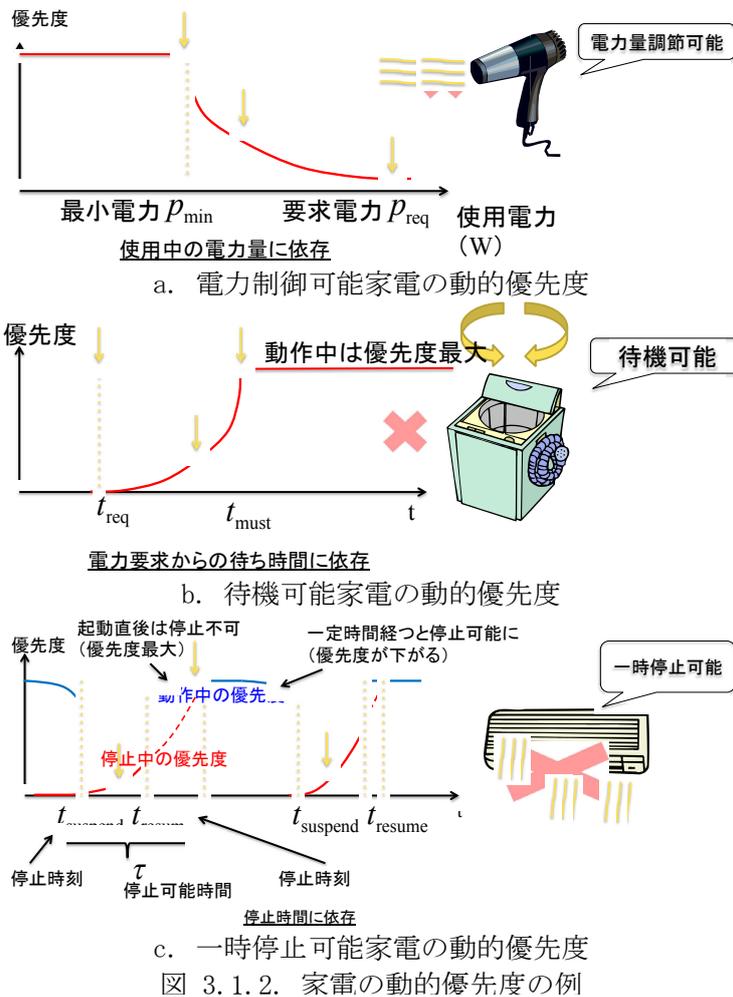


図 3.1.3. に生活実験の結果を示す。実験では、生活パターンを同一にして比較するため、何時に朝食を作り、何時に洗濯を行うというように、生活スケジュールを被験者に与えて、その通りに生活してもらった。最初の一週間は EoD システムを使わずに生活を行いその時の電力使用パターンから、積算電力量を 10%, 30%, 50%削減するように電力使用計画を作成し、次の週からは一週間ずつ、それぞれの電力使用計画を用いて EoD システムによって電力制御を行いながら生活を行った。グラフの青色の線は学習用に EoD を使わずに生活したときの電力使用パターン、赤色がそれをもとに 1日の電力使用計画をたてた結果、緑色が EoD システムを使用したときの電力使用パターンを示す。左側のグラフは瞬時電力であり右側のグラフは積算電力量のグラフである。これらの結果よりそれぞれの 10%, 30%, 50%削減というそれぞれの目標が達成できていることがわかる。また、実験後の被験者の感想では、10%削減時には、電力制御が行われていることにほとんどの場合気づいていなかった。これは照明や TV の明るさ、エアコンの温度設定などを少しずつ制御することで達成できたためと考えられる。また、30%削減時にはポットを沸かすときに動き出すまでに少し待たされるなど、電力制御には気づくことが多かったが、生活の上では不便は感じなかった。一方で 50%削減時には、洗濯機が全く使えなかったなど大きく利便性を損じる場面が目立った。このような結果より、削減率を保証するという本手法の特徴は達成でき、また30%程度の削減であれば生活者に不便さを感じさせることなく自動的に達成可能であるということが分かった。

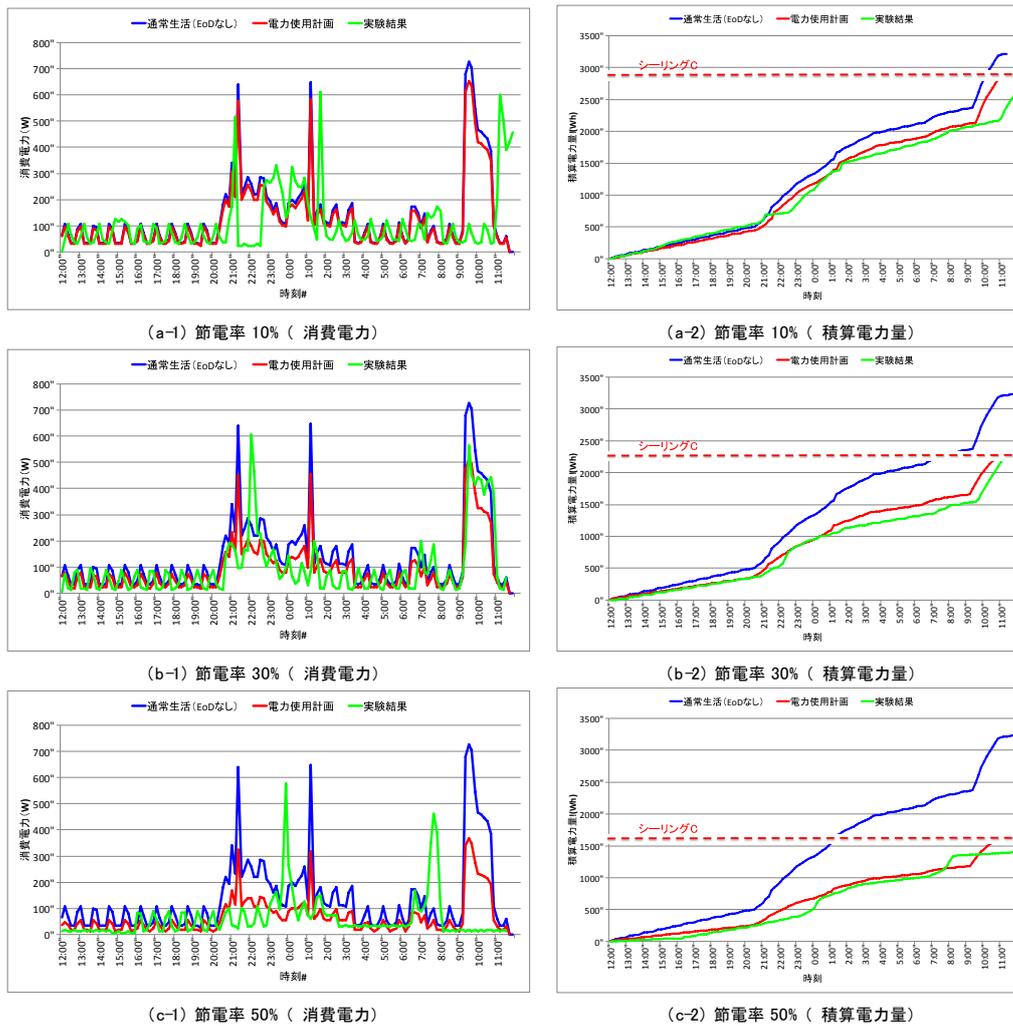


図 3.1.3 EoD の生活実験の結果

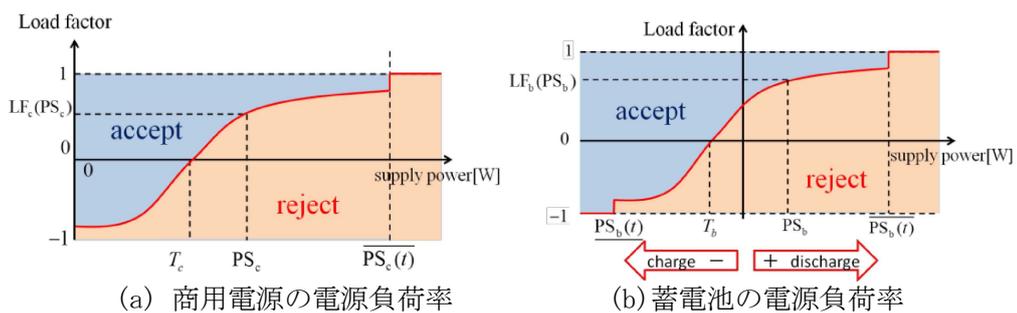


図 3.1.4. 電源負荷率 (Load factor) の例

② EoD の複数電源への拡張と、それをもちいた蓄電池の適応的制御

前の①で説明した EoD システムは単一の電源のみを用いて電力使用機器の電力制御を行う手法であるが、さらにこれを複数電源の管理に拡張した。この需要家が太陽光、燃料電池、蓄電池などの複数の分散電源を持つようになると、いつ、どの電源からどれだけの電力を供給するかが問題となる。ここでは、特に生活の質を損なうことなくピークシフトを実現できる蓄電池の管理について検討した。蓄電池は電力コストの安い時間に電力を貯めておき、電力コストの高い時間帯に放電することで需要家にとって電気代の節約になるだ

けでなく、電力ネットワーク全体からみると需給バランスの平準化に役立つことになる。しかし、需要家の生活パターンが様々に変化する中で適切な蓄電池の充放電制御を行うことは困難であり、また大きな蓄電容量は導入コストの増大につながるといった問題がある。そこで本研究では、前節のEoDシステムを複数電源に拡張し、電源の使用状態によって決まる電源負荷率を定義することで、どの電源からどれくらいの電力を供給するかを決める方法を定義した。また、EoDシステムの電力使用計画の策定の中で、電力使用側の計画と同時に供給側の計画、蓄電池の充放電計画を同時に作成することで、生活パターンに即した適応的な蓄電池の充放電制御を実現する。

電源負荷率は、図 3.1.4.に例を示すように、電源ごとに定義する関数であり、事前に立てた計画通りの供給電力であれば0、それより供給電力が大きければ増加していく指標であり、供給電力が電源にとってどれだけ負担になっているかを示している。蓄電池であれば供給量がマイナスであれば充電、プラスであれば放電として定義する。この関数の傾きは1日の計画の達成度合いで定義し、積算電力量が上限に近づくほど傾きが急になるように定義する。また蓄電池の場合は蓄電量が容量の上限、下限に近づくほど急になるように定義する。このような負荷率を定義した上で、家電から電力マネージャに電力要求メッセージが送られた時、家電の優先度が全ての電源の電源負荷率より大きければ電力使用を許可する。このときに要求家電が使用する電力は、電源負荷率が小さい電源から供給するように電源の供給量を同時に制御する。これによって、事前に決めた電力供給計画、充放電計画に従いつつ、計画の達成度が高い場合や蓄電池の容量の余裕がある場合には優先度が高い家電部は計画以上の電力使用を許可し、逆に達成度が低い場合に容量に余裕がない場合には計画以上の電力使用を許可しないというように、適応的な制御が可能になる。

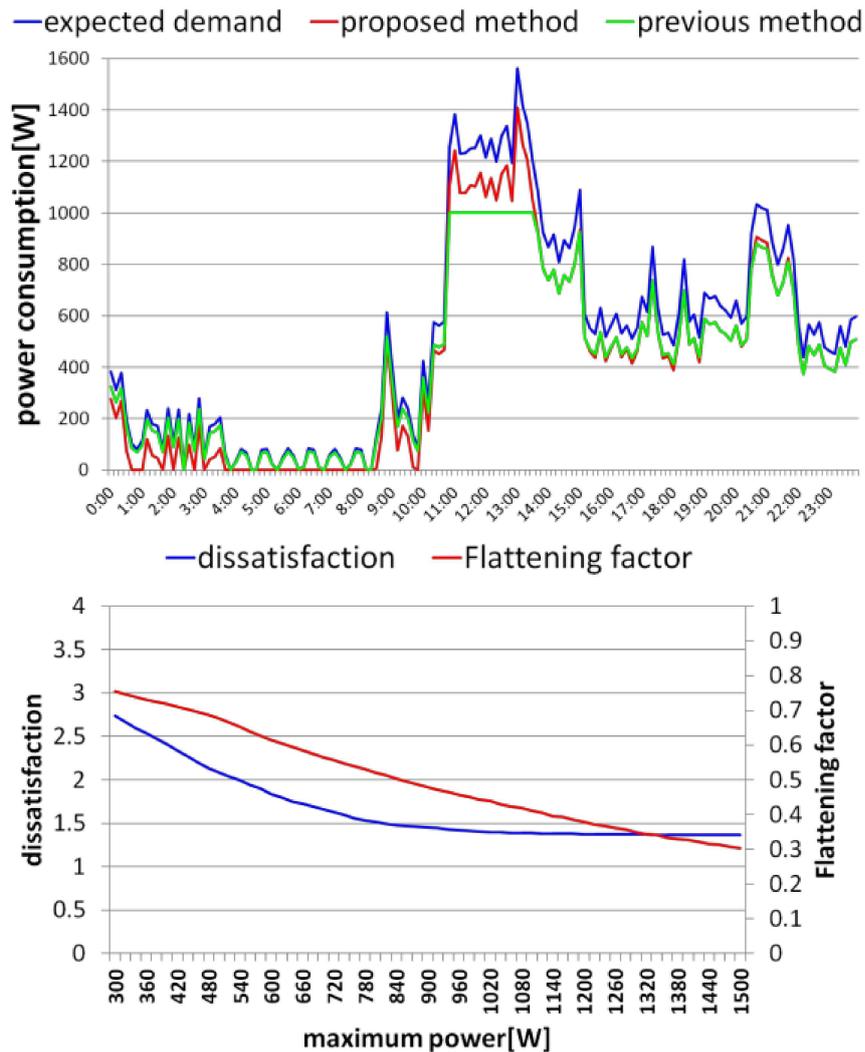


図 3.1.5. 複数電源 EoD の実験結果

実際に生活を行った時の電力使用パターンを用いてシミュレーションを行った結果を図 3.1.5.に示す。左のグラフは商用電源の最大瞬時電力を 1000W とした場合の電力使用計画を示す。グラフの青色の線は予測した電力使用パターン、緑色は蓄電池を使わない場合の EoD における電力使用計画、赤色が蓄電池を使用した場合の電力使用計画を示す。蓄電池を使用しない場合 11:00 から 14:00 において最大瞬時電力を超過するため電力使用計画が大きく削減されているのに対して、蓄電池を使用した場合では最大瞬時電力を超えて電力使用が可能であることがわかる。なお、このときに必要な蓄電池容量は 420Wh であった。また右のグラフには商用電源の最大瞬時電力を 300W から 1500W まで変化させて EoD による電力制御をおこなった場合の商用電源の平準化率と不満足度の変化を示す。平準化率は最大瞬時電力にたいする平均電力の割合で計算あり、1 日の電力供給の変動の大きさを指標であり 1 に近づくほど平準である。また不満足度は、要求電力と実際に使用できた電力の二乗誤差平均であり、大きいほど必要な家電を使用できなかったことを表している。この結果から最大瞬時電力の上限を 700W 程度まで下げても不満足度はほとんど変化していないことがわかる。同じデータで EoD システムを使わずに蓄電池のみによって最大瞬時電力 700W を達成するには 1800Wh の容量が必要であり、EoD システムを使った蓄電池の適応的制御では 3 分の 1 程度の蓄電池容量で、大きなピーク電力の削減が可能であることが分かった。

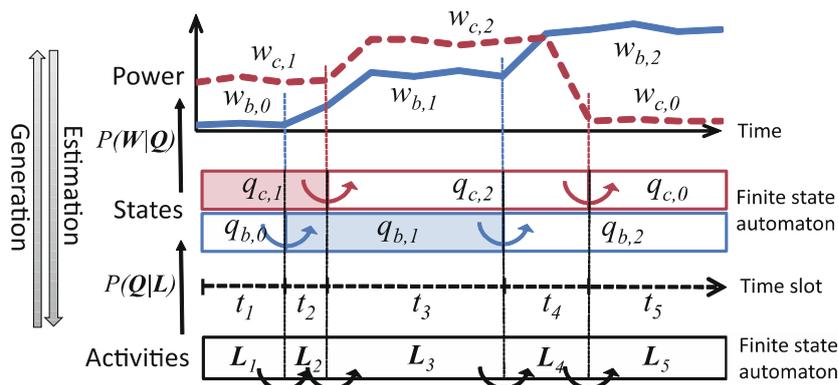


図 3.1.6. 生活行動-電力消費モデル

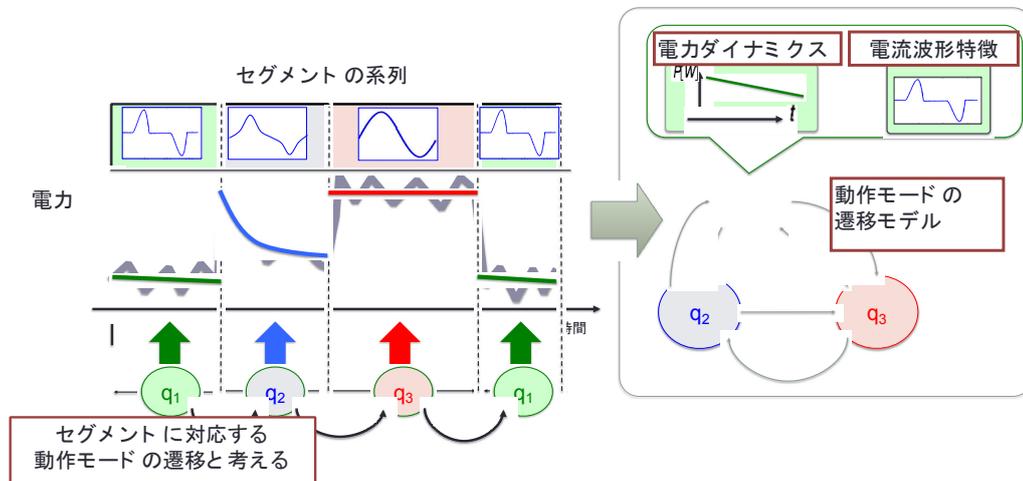


図 3.1.7. 家電の電力変動モデル

③ 消費電力パターン解析による家電の見守り、生活行動推定

需要家向けの電力管理を自動化するためには、個人差や日々の生活行動に依存する電力使用パターンの変化や家電ごとの優先度の変化に対応するため、生活行動パターンを解析することが重要である。本研究では、家電の消費電力パターンのモデル化、解析から使用状況の解析を行い、さらにカメラや位置センサなどの付加的なセンサを使用することなく、電力使用パターンのみから生活行動を推定し、また生活行動ごと、生活者ごとの家電の使用パターンを解析するアルゴリズムを開発した。

図 3.1.6 に示すように家電ごとの消費電力と家電の使用状態、生活行動との関係を確率分布によって表現する生活行動-電力消費パターンモデルを提案した。このうえでまず、家電の消費電力のダイナミクスを解析する手法を開発した。これは図 3.1.7 に示すように、家電の電力変化を同じ動作モードで連続的に電力変動が表せるセグメントに分け、セグメント間の動作モードの変化を時間確率オートマトンで表現し、同一セグメント内の連続的な変化をカルマンフィルタや HMM などの連続モデルで表すセグメントモデルである。このモデルを用いて観測した電力変動パターンをセグメントに分割し、家電の状態を動作モードとして学習、推定するアルゴリズムを開発した。

次に、家電の動作モードの変化にたいしてユーザの家電操作に起因するモード変化かどうかを推定し、家電の配置情報とユーザによる家電操作のタイミングから、ユーザの位置を推定するアルゴリズムを開発した。またさらに、文書解析の分野のトピック分析の手法を適用し、生活行動の推定と生活行動ごとの家電の使用パターンを推定するアルゴリズムを開発

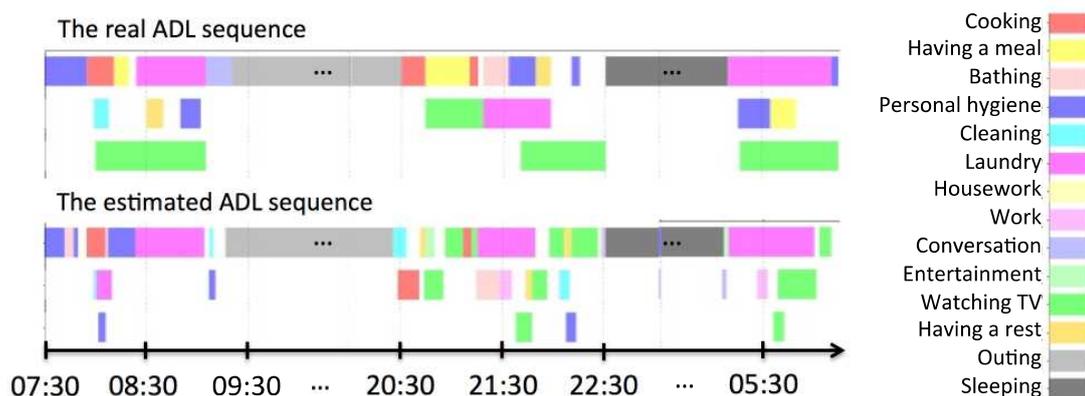


図 3.1.8. 生活行動推定結果

した。これは、家電の使用状態の組み合わせを単語、調理、食事、睡眠などの生活行動をトピックとみなして、LDA(Latent Dirichlet Allocation)と呼ばれる単語ごとのトピックの推定とトピックごとの単語の出現頻度を同時に推定するアルゴリズムを電力消費パターンに適応した。図 3.1.8.に推定結果の例を示す。図の上段は、ある1日の生活行動を生活者へのアンケートによって獲得したもの、下段は提案手法によって推定した生活行動である。時間軸上の色分けは生活行動を表している。また同時に複数の色分けを行っているのはテレビを見ながら食事をするなど、複数の動作を同時に行っていることを表している。この結果より多少の時刻ずれはあるものの、同じ生活行動が推定されていることがわかる。

また、図 3.1.7 に示した消費電力パターンのモデルを利用して、家電の異常状態を検出するアルゴリズムを開発した。これは、確率時間オートマトンによって表現される長期的な動作モードの変化、ある動作モード内の電力変動ダイナミクスの変化、さらに同じ動作モードの電力をさらに詳しく分析した1交流周期内の電流波形の特徴分布を、すべて確率分布モデルで表現したうえで、正常時と検査時のモデルの違いをKL情報量で評価する方法であり、長期の電力使用傾向の変動から短期のダイナミクス、さらに詳細な電流特徴まで統一して分析する方法である。扇風機の異常停止や LED の異常加熱状態での使用、配線の判断線状態などの原因や傾向の異なる異常を検出できている。

#### ④ 工場向け需要家内電力管理の取り組み

本研究グループでは、需要家として家庭だけでなく、特に中小の工場を対象とした電力管理システムに取り組んでいる。中小工場を対象としている理由は、家庭に比べて電力使用量が大きい一方で、エネルギー管理が進んでいないということと、一般的に高圧受電の契約を行っているため、ピーク電力の削減のコスト的な効果が得やすいという事情からである。実際に操業中の民間の2工場に機器毎の電力使用を電力センサによりリアルタイムにモニタリングし、またエアコンを自動制御するシステムを導入した。電力消費パターンの解析に基づく機器使用方法のアドバイスやエアコンの連携制御などにより1工場では 140kW 程度あったピークデマンドが100kW まで削減できている。工場向けシステムは現在実証実験としてだけでなく、ソフトウェア、システム構築のノウハウなどを民間企業にライセンスし、ビジネスとしての展開を進めている。

また、さらに高度なマネージメントを実現するため、EoD システムのコンセプトを工場向けに拡張したアルゴリズムを開発した。①、②で述べた家庭向け EoD では、いつどの家電を使うかは生活スタイルやその時々によって生活によってことなるため、生活者の自由度を妨げない調停アルゴリズムを開発したが、工場では生産する製品、個数、納期と、製品の生産工程によってどの機器をどう使うかが決められる。また、機器間の関係も、型抜きをした後に、整形、色つけといった順序関係や、プレスを行う際にエアを供給するコンプレッサを稼働させるといった依存関係など、機器間の制約関係が確定的に定まるものである。そこで、これらの

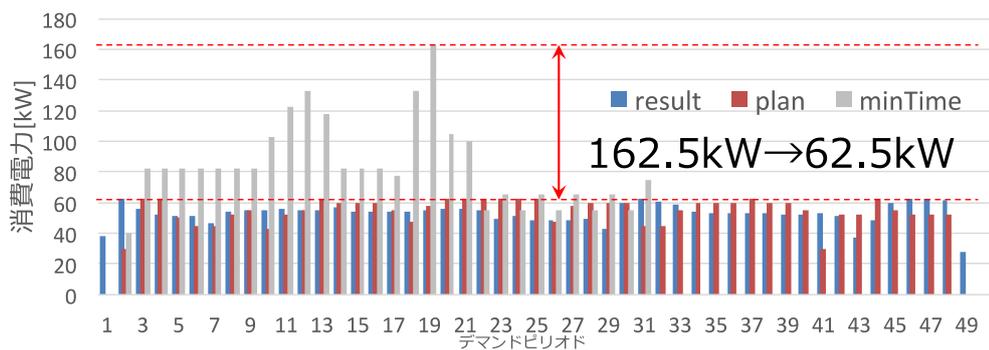


図 3.1.9 工場向け EoD のシミュレーション実験の結果

機器間の制約、た納期や個数などの制約を満たしつつ、ピーク電力が最小となる生産スケジュールを数理計画問題として定式化して最適化する手法と、実運用時に生じる計画とのズレに対して適切に対応しつつ、制約条件を満たしたまま各機器の動作状態を決定するアルゴリズムを EoD システムの電力要求メッセージと優先度の仕組みによって実現した。実際の工場の電力データ、機器情報を用いたシミュレーション実験を行った結果を図 3.1.9 に示す。グラフは30分ごとの平均電力を表しており、灰色は生産スケジュールを最適化せずとにかく手の空いた機器で次の部品を生産するように稼働した場合（実際の工場の電力使用状態稼働に近い）であり、赤色は最適な生産スケジュールを求めた結果、赤色は実際の稼働時にランダムに生産時間のずれや、機器の状態切り替えのエラーを発生させたときの、EoD システムによる生産機器制御の結果を表している。最適化生産スケジュールを使用しない場合のピーク電力 162.kkW に対して、62.5kW までピーク電力が削減できるという結果が得られた。

#### (2) 成果の位置づけ

本研究で提案する EoD システムは、需要家向けの自律的電力制御の仕組みであり、電力使用機器と電力マネージャの調停に基づいて電力使用を行うため、生活者自身が決めた節電率を必ず達成することができる。電力使用計画はユーザが定めた上限を守るだけでなく、デマンドレスポンスや、松山グループで開発したコミュニティ最適化のための事前計画のすり合わせ、当日の計画修正に対応することで、コミュニティの中で需要家間の連携融通のための需要家側プラットフォームとして位置づけられる。一方で機器の使用状態によって動的に決定する優先度は、生活状況にあわせて使用する家電、電力を削減する家電を選択可能である。また、EoD システムを複数家電に拡張することで、電源ごとの発電、買電、蓄電計画が策定でき、需要家が電力消費だけでなく、他需要家への電力供給も行う場合にも計画に従った電力供給が可能となる。CREST FS では、このような需要家を供給と消費を行う需要家という意味で電力プロシューマと名付け、プロシューマで構成されるコミュニティのモデルについて検討した。また、この中で久門グループが担当する電力カラーリングは、需要家内の複数電源の制御を需要家内の電力の安定性を維持しつつ柔軟に行うための基礎技術として位置づけられるだけでなく、プロシューマ需要家間の電力融通を電力網全体の需給バランスに悪影響を与えることなく実現するための重要な基盤技術として位置づけられる。

また、電力消費パターンの解析、生活行動パターンの学習技術は、需要家内の電力の使用状況を詳細に解析、学習、予測する技術であり、これは需要家内の電力制御を自律的、自動的に行う際、さらにコミュニティ内の需要家間連携を自動的に行う際に重要な基礎技術と位置づけられる。

さらに工場向けシステムの取り組みでは、基礎技術の開発だけでなく、現実に操業中の工場への導入、さらにシステムの民間企業へのライセンスを通して、ビジネスとしての展開を視野に入れて展開している。

### 3.2 地域ナノグリッドのための分散協調制御理論の構築（京都大学 松山グループ）

#### (1) 研究実施内容及び成果

太陽光をはじめとする再生可能エネルギーや、電気自動車やヒートポンプ給湯器などの消費電力の大きな需要機器が大量に導入されることで、供給と需要の両面において電力網に大きな変動を生み出すと予想される。一方で、各需要家が所有機器をそれぞれの許容範囲内で制御することで、電力の需給バランス調整の一端を担うことができると考えられる。このとき、この需要家側の制御を意味あるものにするには、需要家同士が適切に連携する必要があるが、一方で直接制御型のデマンドレスポンスのように、アグリゲータが外部から需要家の機器を制御することは、需要家側の生活や活動パターンを十分考慮できないという問題がある。そこで本グループでは、加藤グループで開発する EoD システムのように、内部機器を自動制御できるようなエージェント型のエネルギー管理システムを各需要家が導入した際に、これら複数の需要家が仮想コミュニティを形成する状況を想定する。このとき、電力平準化や需給バランス調整のために、どの需要家同士がどのように連携すればよいかという、分散協調・分散最適化の基本アルゴリズムの開発を行った。

本研究では、まず需要家間をつなぐためのコーディネータを、代表となる需要家、もしくは小売事業者等が母体となって担うことを想定する。つまりコーディネータは、市場等からの調達に対するインバランスの最小化や、コミュニティ内の地産地消の実現、コミュニティ内のピークカット（マンション等小規模コミュニティでの一括受電契約料の削減）といったインセンティブを持つ。このとき、各需要家における需給量の事前計画調整や、リアルタイム電力融通を実現するためには、需要家の内部と外部、すなわち各需要家内における制御と、需要家間をつなぐコーディネータにおける制御とをいかに分離・モジュール化し、かつ協調させるかが重要となる。そこで本研究では、各需要家はコーディネータに対して内部の機器や制御方式の情報については開示せず、需給プロファイル（需要家が発電・蓄電による逆潮ができる場合は供給プロファイルも含む）の情報のみのやりとりによる「交渉型」の協調方式（図 3.2.1）を検討した。

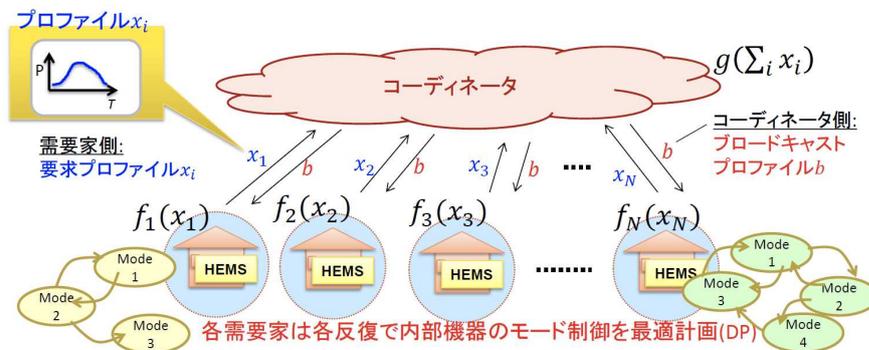


図 3.2.1 交渉型協調による分散モードスケジューリング

以下では、この計画・予測プロファイルを表現するための確率モデル(①)、前日段階での事前計画調整アルゴリズム(②)、当日の変動を吸収し計画段階とのずれを最小化する協調制御手法(③)、連携を行う需要家をサブグループにまとめたうえで階層的に分散協調制御を行う手法の開発(④)について述べる。

#### ① 需要家内における電力需給量の確率的予測モデル

需要家間における事前計画すり合わせ、およびリアルタイム電力融通に必要となる、各需要家の電力需給量を、高精度かつ変動幅も含めて予測するためには、時系列パターンの確率モデルの利用が適している。そこで、各使用機器の電力変動をモード遷移や持続長に基づいて隠れセミマルコフモデルとしてモデル化するとともに、実測値に基づいて

学習した確率モデルにより、電力変動の予測・推定を行う手法を開発した。電気自動車の充電タイミングやヒートポンプの動作タイミングなど、機器使用の時間シフトは需要家側の制御変数の中でも重要な位置づけを占めるが、本モデルではこの機器の使用タイミングのシフトに関する許容度を直接的に確率分布として表現できるという利点がある。

## ② 需要家間の事前計画調整アルゴリズムの開発

前日の事前計画段階では、各需要家はそれぞれの目的(不満足度の最小化など)を持ち、一方でコーディネータは平準化や需給バランスといった目的を持つ。互いにこれらの目的を直接知ることができないような状況であっても、Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM) などの分散最適化手法を用いることで、反復的な交渉によりそれぞれの需要家での需給プロファイルを決定することができることを示した。具体的には、各需要家からコーディネータへ、予想される需給プロファイル(需要家が発電・蓄電による逆潮ができる場合は供給プロファイルも含む)を送り、ここから計算されたブロードキャスト信号をコーディネータはコミュニティ内の需要家に対して送信する、ということを繰り返すというアルゴリズムとなる。この各反復において、各需要家は、自分の持つ機器の使用タイミングに関する許容度と、コーディネータからのブロードキャスト信号とに基づき、機器使用の制御量を計算する。本研究の成果のひとつとして、分散的に需要家それぞれが所有機器のモード切替タイミングを調整するという「分散モードスケジューリング」方式の提案があり、特に①のモード切替系の確率モデルによって機器の使用タイミングの許容度を表現している場合、各需要家内で最適モードスケジューリングは単純な動的計画法となることを示した。

図 3.2.2 の 1 から 3 段目は、時間シフトの許容度が高いグループと低いグループの 2 群が合わさることで 1 日のなかで総消費電力のピークを形成している際に、コミュニティ全体としては平準化を実現するシミュレーション結果(上から、最適化前、5 回の反復、20 回の反復)である。赤実線は許容度の低いグループの総消費電力であるが、本手法により、許容度の高い需要家は、許容度の低いグループの消費時間帯を避けつつ計画値の調整を行うことができることを示している。同図の 4 段目は、平準化に関する目的関数が最適化とともに最小化されていく様子を表しており、最初の 5 回程度の反復で大きくピークカットされることがわかる。

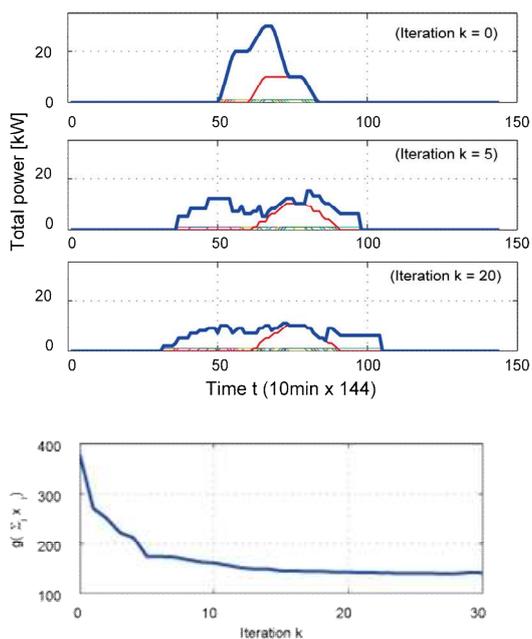


図 3.2.2 事前計画における平準化のシミュレーション例

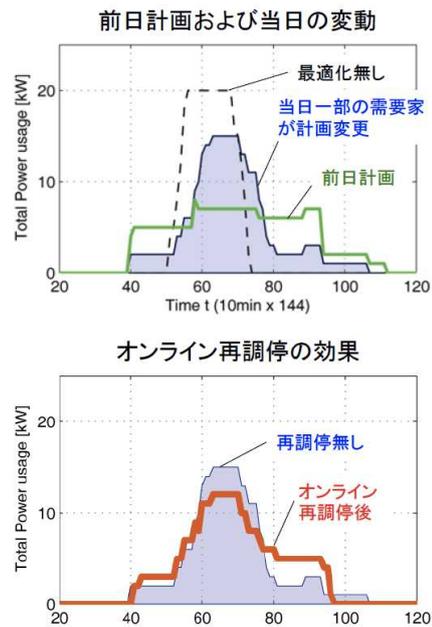


図 3.2.3 オンライン再調停のシミュレーション例

### ③ 需給バランス調整のためのオンライン分散協調制御法の考案

事前計画通りの電力需給量が各需要家で達成されない場合は、変動分を当日に再度調整する必要がある。そこで、計画段階からのずれが生じることが判明した際に、電力融通をオンラインで行う手法を開発した。②と同様に、各需要家の需給パターンを、確率的モード切替系の数理モデルとして扱うことで、確率的な予測値と、実績値もしくは確定値の混在した需給プロファイル調整を実現し、シミュレーションを通じてアルゴリズムの動作を検証した。図 3.2.3 の上段は、最適化を一切行わない場合（破線）に対して、前日の事前計画調整で十分な平準化を達成（緑実線）し、その後、7割の需要家が当日段階で計画を逸脱するとした場合のシミュレーション結果を示している（網掛け、青実線）。この条件のように、多くの需要家が計画値通りの機器の使用を行わない場合、再び大きなピークが生じてくる。これに対しオンラインで再調停を行うことで、同図の下段に赤線で示すように、計画からの逸脱を軽減することができる。

### ④ 需要家のグルーピングアルゴリズムおよび階層的分散協調制御法の開発

「どの需要家同士が連携を行うか」という問題に対し、需要家間でどれだけ相補的に変動吸収が可能かを調べることで、コーディネータが需要家のサブグループを決定する方法について検討を行った。このとき、各需要家の変動に対する適応性を、②の事前計画段階でコーディネータが推定するとともに、グループとしての適応性を最大化するように、各需要家をサブグループへ割り当てていく。③のオンライン再調停手法では、計画からの逸脱（変動）が発生するたびに、全需要家とコーディネータとが通信しあう必要があるが、サブグループを形成することにより、変動をより小規模の連携で吸収できるため、通信状況によりロバストで、かつ応答速度のよい需給バランス調整が可能となる。

このとき、サブグループ内だけでは変動を吸収できない状況もありうる。そこで、②や③で開発したコーディネータと需要家との交渉型の分散最適化を、コーディネータとサブコーディネータによるサブグループ間の連携、およびサブコーディネータと末端需要家によるサブグループ内の連携、という階層的な分散最適化手法に拡張した。このとき、上

位層のサブグループ間の連携に比べ、下位のサブグループ内の連携では高い頻度で通信できるものとした。本研究の発展可能性として、(1) 階層的分散最適化は入れ子構造となっており、多層の連携アーキテクチャへ拡張できること、(2) サブグループの目的関数を導入することができるため、サブグループを物理的電力ネットワークと関連付けて定めることで、送配電網に関する物理的制約を導入できることがある。さらに、本研究で提案するサブグループ間の協調メカニズムは、複数の小売事業者が連携してインバランスを最小化するような、バランスンググループにおける連携への応用も考えられる。

## (2)成果の位置づけ

本研究で提案する分散協調手法は、ヘテロなエネルギー管理システムを統合できる点に特徴がある。これは、各需要家が互いの目的関数や需給プロファイルを交換することなく、分散的に使用機器の計画策定や調整を行うからである。他の類似研究では、各需要家で同一の制御方式をとることが多いのに対し、本手法におけるコーディネータは各需要家の制御方式を知る必要がないため、計画値に従って自律的に内部機器を制御できるようなエネルギー管理エージェントであれば、様々なタイプのシステムが混在していても利用可能である。

### 3.3 電力の物理的特性を踏まえた分散協調電力制御基板の構築(京都大学 久門グループ)

#### (1)研究実施方法・実施内容

電力ネットワークにおける電力の物理的特性を踏まえた上で、情報通信ネットワークを利用することにより、エネルギーの送り手と受け手が常に協調してエネルギーを伝送するためのユニバーサルなモジュールを設計・試作し、サイバーフィジカルシステムとして電力ネットワークを分散協調電力制御するシステムの構築を行った。

ユニバーサルなモジュールとしては、双方向性をもつ AC-DC 変換モジュールを最も基本的な構成単位として設計した。基本的な構成を下図に示す。定格は AC 側 100V、DC 側 216V、容量 1kVA である。スイッチング素子には損失の小さい SiC パワー MOSFET を用い、DC 側から AC 側へは降圧のインバータとして動作、AC 側から DC 側は昇圧のコンバータとして動作する。デジタル電源制御の基準となる PWM 周波数は 60kHz とした。コンバータとして動作する場合の交流側に同期する機能はゼロクロス検出に基づいてフルデジタルで実装し、通信機能として ZigBee による無線通信の機能を持たせた。蓄電池は定格容量 1.2kWh、定格出力 1kw、電圧 216V のリチウムイオン蓄電池を基本単位とし、それらを組み合わせることにより大容量化が可能な形とした。

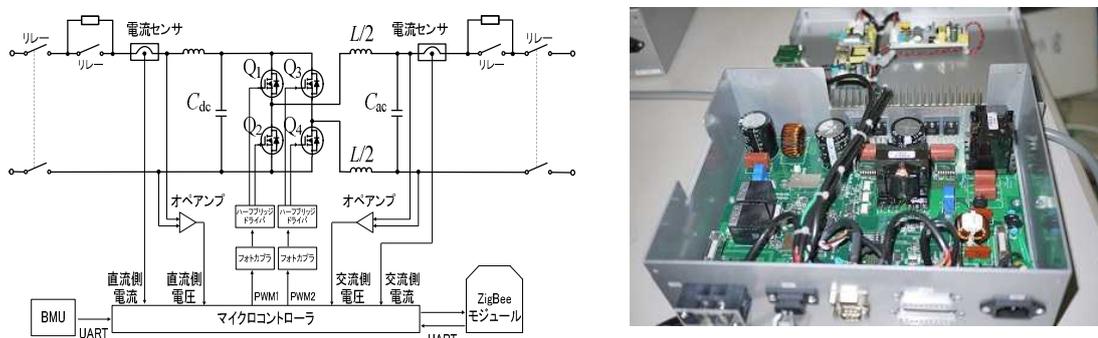


図 3.3.1 双方向 AC-DC 変換モジュール

回路設計においては、安定した動作を実現するための素子選定、PWM 制御した場合のノイズを考慮した回路や基板レイアウトなどにより、直流と交流基本周波数だけでなく、直

流・基本波・高調波・PWM周波数、スイッチングノイズ周波数まで考慮したロバストな動作を実現している。一方で、ソフトウェアにおける制御についても安定した同期機能を実現するためのキャリブレーション法やひずみの小さい正弦波を出力する手法、力率を制御する手法、正確な測定値を得るための信号処理、異常動作を考慮した種々の安全対策などが実装されている。

電力制御のためのモデル化としては、状態平均化に基づくテブナンの等価回路の導出やダイナミックフェーザモデルなどを用いて行い、テレゲンの定理に基づいて瞬時電力や複素電力・拡張された電力などの電力フローにより、その振る舞いの特徴づけを行った。また、実際に設計したモジュールに対して、実機から等価回路パラメータを抽出する手法も開発し、得られたモデルによるシミュレーション値と実験結果を比較することにより、妥当なモデルが構成できることを確認した。蓄電池に対しても同様にパラメータ推定手法を開発している。これらのモデル化に基づいてPWM周期の時間スケール(マイクロ秒)、交流基本周期の時間スケール(ミリ秒)、通信遅延の時間スケール(秒)の3つのスケールで協調させることにより電力のもつ物理的な特性とサイバースystemを結びつけて協調動作させることを実現している。

実際に送り手と受け手が協調したP2Pの電力伝送を実現する上では無線通信による遅延が重要な要素となる。各モジュールが自己の処理における遅延を自ら測定し、それを相手に知らせることにより通信遅延を考慮した同時性の確保を実現した。また、交流のゼロクロスを利用することにより通信遅延のばらつきに対するロバスト性を持たせる手法も実装している。下図に同時性を実現するために行われる送り手と受けてのモジュール間通信と、ゼロクロスに基づく同時性確保の実測結果を示す。モジュール間通信においては電力要求の後、ZigBeeのACK信号に基づいてZigBeeの通信時間を見積もり、相手先の遅延時間を考慮した上で電力授受を行うStart信号を送信する。右図ではStart信号に基づくばらつきを交流波形のゼロクロスで補正している様子を示している。

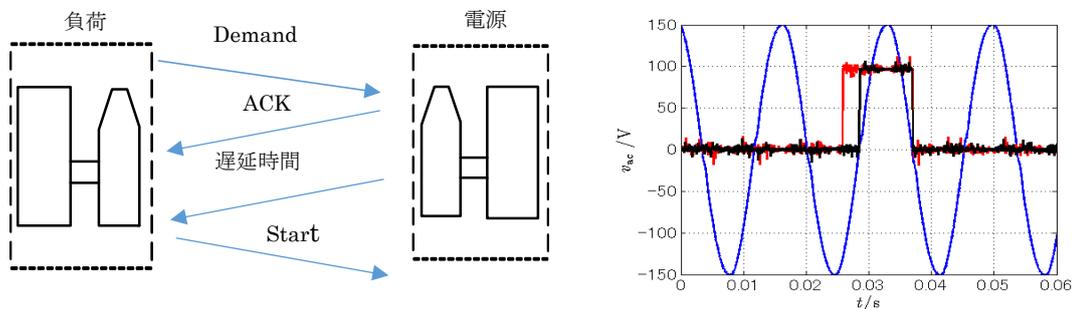


図 3.3.2 同時性を実現するための通信とゼロクロスに基づく同時性の確保

ユニバーサルなモジュールとして使用できる機能としては、複数電源の分散協調並列運転により容量を増やせるほか、これらのモジュール 2 個と蓄電池を組み合わせることによりネットワークを分割して協調電力フロー制御を行う双方向 e-FW (energy Fire Wall)・e-Router(energy Router)の構築、180度位相が異なる出力により単相3線出力、動作中の周波数可変機能、DC-DC変換のモードも実現し、種々の協調電力フロー制御ができることを確認した。

送り手と受け手が協調したP2Pエネルギー伝送が電力ネットワークに与える影響については、地域ナングリッドの回路モデルである分岐線路の線路パラメータ推定法とともに検討し、送り手と受け手の同時性を保つことにより他のネットワーク構成機器への影響が極めて小さく抑えられることを確認した。また、同時性については提案手法では交流のゼロクロスに基づいているが、時刻同期による同時性と同様の効果が得られることが確認できた。さらに、事故の判定についても過渡現象に対する時間領域でのパラメータ推定に基づく方法

の有効性を確認した。

## (2)成果

設計・試作した AC-DC 変換モジュールと蓄電池を用いることにより、ミリ秒のオーダーで同時性を保った上での、送り手と受け手、送り手同士、受け手同士が協調したP2Pエネルギー伝送を実現した。簡単なモデル例による実験結果を下図に示す。図左のような孤立ネットワークを考え、EVからの出力は最大200W、パワーコンディショナシステム(PCS)の出力は最大100Wとして、これらを用いて300Wの冷蔵庫を動作させる状況を想定する。このとき、EVからの電力投入が冷蔵庫の消費開始より早いと、PCSに定格以上の電力が流れ、PCSが破綻する。一方でEVからの電力投入が冷蔵庫の消費開始より遅いと、PCSから大きな電流が引き出され、やはりPCSが破綻する。このように、送り手と受け手の同時性が保たれないと、想定外の電力フローが発生し、ネットワークのダウンにつながる。

実際に同時性を確保してエネルギー伝送を行った結果が下図右である。右上図が観測された通信を表現し、右下図は電流の流れである。両図にある正弦波は交流の電圧波形である。無線通信は交流の周期に比べてタイムスケールが長いため、同時性を保ったエネルギー伝送のためには、遅延時間を考慮したやりとりが重要であることが確認できる。

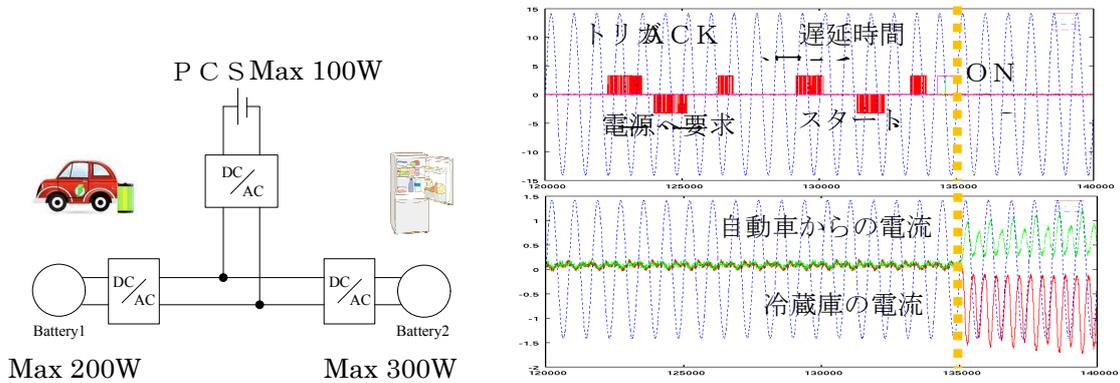


図 3.3.3 同時性を実現するための通信とゼロクロスに基づく同時性の確保

## (2)成果の位置づけ

エネルギー伝送における送り手と受け手が意識したやりとりは、従来は託送にみられるように通常は分のタイムスケールの同時性で考えられており、急峻な電力フローの変化など安定性に関しては別の方法で対応する必要があった。一方、本研究の手法はミリ秒のタイムスケールでの同時性を確保したエネルギーの授受であり、電力フローの協調制御に基づいてネットワークの安定性に対しても貢献できる、新しい方法を実現したと言える。

## § 6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1 件、国際 (欧文) 誌7件)

1. Takekazu Kato, Kento Tamura, and Takashi Matsuyama: Adaptive Storage Battery Management based on the Energy on Demand Protocol, Proc. Third IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm2012), pp. 43-48, Tainan Taiwan, 2012.11.
2. 加藤丈和, 湯浅 健史, 松山隆司: オンデマンド型電力制御システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 54, No. 3, pp.1185-1198, 2013. 3.
3. T.Hisakado, R. Kazaoka, K. Fukae, O. Wada (Kyoto Univ.)、Modeling of Bidirectional AC-DC Converter Modules for Power Flow Design、Proc. NOLTA, Santa Fe、平成 25 年 9 月 9 日
4. Hiroaki Kawashima, Takekazu Kato, and Takashi Matsuyama, "Distributed Mode Scheduling for Coordinated Power Balancing", 4th IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm 2013), pp.19-24, Vancouver, Canada, Oct. 2013. (DOI: [10.1109/SmartGridComm.2013.6687927](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2013.6687927)).
5. Xinpeng Zhang, Yusuke Yamada, Takekazu Kato, and Takashi Matsuyama: A Novel Method for the Bi-directional Transformation between Human Living Activities and Appliance Power Consumption Patterns, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E97-D, No.2, pp.275-284, 2014.02.
6. Xinpeng Zhang, Takekazu Kato, and Takashi Matsuyama, "Learning a Context-aware Personal Model of Appliance Usage Patterns in Smart Home," 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference - Asia (ISGT ASIA), no. 1569871535, pp. 1-6, 2014. 5.
7. Rodrigo Verschae, Hiroaki Kawashima, Takekazu Kato, and Takashi Matsuyama, "A Distributed Coordination Framework for On-line Scheduling and Power Demand Balancing of Households Communities", European Control Conference (ECC 2014), pp.1655-1662, 2014. 6.
8. Rodrigo Verschae, Hiroaki Kawashima, Takekazu Kato, and Takashi Matsuyama: A Distributed Hierarchical Architecture for Community-based Power Balancing, 5th IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm 2014), pp. 169-175, Venice, Italy, 2014.11.3-6.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

特になし

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議6件、国際会議 2 件)

1. 加藤丈和:エネルギーの情報化の取り組みに関する紹介, 信学技報, vol. 112, no. 357, PRMU2012-82, pp. 73-73, 2012.12(特別講演)
2. 松山隆司, "エネルギーの情報化によるスマートコミュニティの実現", 2013 年度日本建築学会大会 情報システム技術部門 研究協議会資料, pp. 3-9, 北海道, 2013. 8. 30.
3. 加藤丈和, 川嶋宏彰, "『エネルギーの情報化』に基づく地域ナログリッドの構築および実証", SICE 制御部門 社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御調査研究会 第 2 回講演会, 2013.9.13.
4. 加藤丈和, EoD:削減率を補償する需要家ない電力制御システム, KKE-Vision 2013, 2013.10.17.
5. Hiroaki Kawashima, "Coordinated Power Balancing in a Community", 10th

Japanese-German Frontiers of Science Symposium, JGFoS (JSPS-AvH 第10回日独先端科学シンポジウム), 2013.11.1.

6. 川嶋宏彰, “需要家間連携のための分散モードスケジューリング”, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI'14), pp. 54-58, 2014.5.22.
  7. 加藤丈和: プロシューマ型スマートコミュニティの構築, 知的環境とセンサネットワーク研究会 (ASN), 2014.7.30.
  8. Takekazu Kato, “Energy Management and Smart Community by Cooperative Distributed Prosumers,” Sweden-Kyoto Symposium, 2014.9.12.
- ② 口頭発表 (国内会議3件、国際会議0件)
1. 深江一志、風岡諒哉、久門尚史、和田修己、ラプラス変換を用いた双方向 AC/DC コンバータの平均化テブナン等価回路、電子情報通信学会総合大会、岐阜、平成25年3月20日
  2. 田邨優人、高井勇志、加藤丈和、松山隆司: 電流波形パターン解析に基づく電気機器の異常検出・劣化診断, 信学技報, vol. 113, no. 328, ASN2013-115, pp. 135-140, 2013.11.29.
  3. 枝川卓也、深江一志、久門尚史、和田修己(京都大学)、タイトル、電気学会電力技術電力系統技術合同研究会、大阪府立大学、平成26年9月25日
- ③ ポスター発表 (国内会議1件、国際会議0件)
1. 黒瀬祐平、川嶋宏彰、加藤丈和、松山隆司: 確率的状態遷移モデルを用いた家電の消費電力変動予測, 信学技報, ASN2013-32, pp.159-162, 2013.5.16.

#### (4)知財出願

- ①国内出願 (0件)  
なし
- ②海外出願 (0件)  
なし
- ③その他の知的財産権  
非公開

#### (5)受賞・報道等

- ①受賞
  1. USN 研究賞、土師浩平、加藤丈和、松山隆司、2013.5.16.
- ②マスコミ(新聞・TV等)報道
  1. 日本経済新聞、省エネ技術、京大と研究、2012年3月30日
  2. 日経ビジネス、人と家電は友達になれるか、2013年10月21日
  3. 環境ビジネスオンライン、富士通など、京大に「エネルギーの情報化共同研究講座」を開設、2013年4月3日
  4. エコニュース 日経 BP 環境経営フォーラム、富士通、京都大学大学院などと産学連携の「エネルギーの情報化共同研究講座」開設、2013年4月3日
  5. 電波新聞、日東電工など エネルギー情報化共同研究講座 京大大学院に開設、2013年4月2日

### ③その他

1. 加藤丈和, JST CRESTプロジェクト『「エネルギーの情報化」に基づく地域ナノグリッドの構築および実証』について, エネルギーの情報化 WG2012年度第2回会合, 2012. 10. 31.
2. 松山隆司: スマート家電、スマートハウス、スマートコミュニティ, 月刊不動産流通, No. 368, pp. 8-9, 2013. 1. 5.
3. 松山隆司: 【オンデマンド型電力制御システム】電力需要を常時監視 家電制御でピークカット, 日経エコロジー, pp92-93, 2013. 3. 8.
4. 加畑博也, 電力カラーリング: 複数電源の分散協調制御アルゴリズム, 平成24年度京都大学修士学位論文公聴会, 2013. 2. 14.
5. 山田祐輔, 生活行動と家電電力消費パターンの相互変換アルゴリズム, 平成24年度京都大学修士学位論文公聴会, 2013. 2. 14.
6. 湯浅健史, 単一電源環境におけるオンデマンド型電力制御システムの実現と評価, 平成24年度京都大学修士学位論文公聴会, 2013. 2. 15.
7. 風岡諒哉, 双方向 AC-DC コンバータを用いた交流ネットワークの電力フロー設計, 平成24年度京都大学修士学位論文公聴会, 2013. 2. 12.
8. 加藤丈和, 川嶋宏彰, 久門尚史『「エネルギーの情報化」に基づく地域ナノグリッドの構築および実証』の研究成果と今後の展開
9. 川嶋 宏彰: 需要家協調型エネルギーマネジメントのための分散最適制御, エネルギーの情報化 WG2013 年第2回会合, 2013.9.30.
10. 高井 勇志: 工場向け EMS~濱中製作所での成果について, エネルギーの情報化 WG2013 年第2回会合, 2013.9.30.
11. 加藤丈和, 張信鵬: 消費電力パターンの解析による人物行動推定とその応用, エネルギーの情報化 WG2013 年第3回会合, 2014.1.7.
12. 加藤丈和: スマートエネルギーマネジメントのための分散協調型電力カラーリング, エネルギーの情報化 WG2013 年第3回会合, 2014.3.24.
13. 久門尚史: 送り手と受け手が協調したP2Pエネルギー伝送システム, エネルギーの情報化 WG2013 年第3回会合, 2014.3.24.
14. 加藤丈和: グリッドパリティ時代を見据えたプロシューマ型スマートコミュニティの実現, エネルギーの情報化 WG2014 年第1回会合, 2014.7.8.
15. 加藤丈和: 電力カラーリングの最新研究成果・デモ(デモ展示), エネルギーの情報化 WG2014 年第2回会合, 2014.10.23.
16. 高井 勇志: 電気機器の異常検出のための消費電力変動モデル, エネルギーの情報化 WG2014 年第2回会合, 2014.10.23.

### (6)成果展開事例

#### ①実用化に向けての展開

非公開

#### ②社会還元的な展開活動

非公開

## § 7 研究期間中の活動

### 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2013年4月10日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年4月17日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年4月24日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年5月15日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年5月29日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年6月5日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年6月19日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年7月2日	エネルギーの情報化共同研究講座創設記念シンポジウム【JST CRESTプロジェクトセッション】	品川プリンスホテル メインタワー 宴会場	149人	学術交流, 産学交流
2013年7月10日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年7月31日	チーム内ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST 進捗確認
2013年8月26日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	15人	CREST FS 検討のためのミーティング
2013年9月30日	エネルギーの情報化WG 第2回会合 (WG 会員, CREST 関係者のみ)	京都大学 吉田キャンパス 本部構内百周年時計記念館 2F 国際交流ホールII	52人	学術交流, 産学交流
2013年10月15日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	20人	CREST FS 検討のためのミーティング
2013年11月27日, 28日	CREST FS 日欧ミーティング(非公開)	トヨタヨーロッパ(ベルギー, ブリュッセル)	20人	CREST FS 検討のためのミーティング
2014年1月7日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	24人	CREST FS 検討のためのミーティング

2014年1月7日	エネルギーの情報化WG 第3回会合 (WG 会員, CREST 関係者のみ)	京都大学 吉田キャンパス 本部 構内百周年時計記念館 2F 国際交流ホール I	100人	産学交流, 学術交流
2014年3月13日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	23人	CREST FS 検討のためのミーティング
2014年3月24日	エネルギーの情報化WG 第4回会合 (WG 会員, CREST 関係者のみ)	京都大学 吉田キャンパス 本部 構内百周年時計記念館 2F 国際交流ホール II	60人	産学交流, 学術交流
2014年3月26日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	6人	CREST FS 検討のためのミーティング
2014年10月23日	エネルギーの情報化WG 第1回会合	京都大学 吉田キャンパス 本部 構内百周年時計記念館 2F 国際交流ホール III	65名	産学交流, 学術交流 電力カラーリングデモ
2014年4月18日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	2名	CREST FS 検討のためのミーティング
2014年5月29日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	4名	CREST FS 検討のためのミーティング
2014年6月5日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	4名	CREST FS 検討のためのミーティング
2014年6月8日	CREST FS サイトビジット (非公開)	京都大学	14名	CREST FS サイトビジット
2014年7月1日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	5名	CREST FS 検討のためのミーティング
2014年7月8日	エネルギーの情報化WG 第1回会合	京都大学 吉田キャンパス 本部 構内百周年時計記念館 2F 国際交流ホール III	81人	産学交流, 学術交流
2014年7月14日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	10名	CREST FS 検討のためのミーティング
2014年7月30日	CREST FS ミーティング (非公開)	京都大学	5名	CREST FS 検討のためのミーティング

2014年9月8日	CREST FS サイトビジット (非公開)	京都大学	14名	CREST FS サイトビジット
2014年10月23日	エネルギーの情報化 WG 第2回会合	京都大学 吉田キャンパス 本部 構内百周年時計記念館 2F 国際交流ホールIII	65人	産学交流, 学術交流 電力カラーリングデモ

## §8 最後に

本プロジェクトでは、需要家群の連携によるボトムアップの電力管理の仕組みの構築を目的とし、それを需要家内の電力管理システムの開発、需要家間連携によるコミュニティ平準化アルゴリズムの開発、需要家間の電力授受のための物理的電力制御基盤としての電力カラーリング技術の開発の3つの研究項目を目標で研究開発を進めた。各項目について基本的な技術の開発と有効性の検証は達成できた。また実証においては、需要家ごとの実証として、エコハウス、スマートマンションにおける家庭向け電力管理システムの生活実証、および、操業中の工場へのシステムの導入と実証を達成した。需要家間連携の検証としては、シミュレーションによる実験によって単純な需要家モデルにおける有効性を確認した。また電力カラーリングについては、電力ルータの試作機を開発し、実機によるデモンストレーションでその有効性を確認した。

実用性については、家庭用電力管理システムは生活実験により有効性の検証を行ったがまたプロジェクトで用意したスマートマンションに被験者に交代で生活してもらって検証したため検証例が少なく、検証期間が少なく、今後実用化に向けたより大規模かつ実際に生活している家庭での実験が必要と考えられる。またシステムを被験者ごとに調整する必要があり、学習機能の拡張、ユーザインタフェースの開発などが必要である。

コミュニティの実証では、シミュレーションによる検証を行ったが今後実際に需要家同士を連携するためのプロトコル、インタフェースの開発とともに、実際の多数の需要家をあつめた実証実験が必要である。

電力カラーリングの開発では、実験室でのデモとしては実機で動作するシステムが構築できたが今後実用化に向けて安全性の検証、さらに実際の電力網における検証を行っていくことが必要である。

研究費の使い方としては概ね計画通りに執行し、研究成果に寄与したが、2.5年の短期間のプロジェクトのため、研究員を見つけるのが難しく、雇用が計画通りに実施できずに予算執行計画の変更を余儀なくされた。