

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「協調 EMS 実現手法の創出とその汎用的
な実証および評価の基盤体系構築」

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：林 泰弘
(早稲田大学理工学術院先進理工学部、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究は、住宅のエネルギー管理システム(HEMS: Home Energy Management System)と、系統電力による中央制御型の配電ネットワークのエネルギー管理システム(GEMS: Grid Energy Management System)の双方に着眼し、予測・運用・制御の一貫型のエネルギー管理フローに基づく、HEMS と GEMS が協調する新しい EMS の実現手法を創出することを目的として、

- A. 協調 EMS 実現手法の構築
- B. 協調 EMS 実証基盤体系の構築
- C. 協調 EMS 評価体系の構築
- D. シミュレーションプラットフォームを用いた協調 EMS の検証

の四項目を実施項目として掲げて実施を行った。

上記項目 A については、HEMS、GEMS それぞれにおける予測、運用、制御に関する要素技術の開発、及びそれらを統合することによる EMS の枠組みの構築を行った。HEMS、GEMS 両方において重要と考えられる家庭向け太陽光発電システム(PV)、及び負荷電力量の予測技術に関しては、構築したデータベースの中から現在の気象条件などの情報に基づいて類似する過去事例を抽出し、翌日の電力量推移パターンの予測を行うJIT(Just-In-Time)モデリングに基づく予測システムの構築を行った。また、HEMS において重要となる家庭内エネルギー機器の動特性を考慮した数理モデルに基づく機器運用計画技術の開発のため、家庭用コージェネレーションシステム(CGS)の試験装置を構築し、予測結果として得られるエネルギー需要シナリオを用いる確率計画法に基づく運用手法を開発した。また、需給逼迫時などに予測と実際の間に生じた乖離への対応を可能とするため、各家庭のエネルギー利用パターンから需要家にとっての利便性を損ねないような機器制御の優先度を学習することで家電機器の自動制御の指針を定める手法を開発し、特に空調機器等の制御に際しては電気設備のエネルギー消費量削減に加え、住人の熱的快適性を考慮した窓・日射遮蔽ブラインド・断熱ブラインド・エアコンの協調制御の枠組みを開発した。また、家庭向け PV が多数連系された高圧、低圧配電系統における電圧管理のための機器運用、制御に関する GEMS 技術開発を行なった。高圧系統においては配電用変電所と配電線に設置される電圧制御装置(LRT、SVR)を対象とし、運用パラメータを最適化問題の観点から決定するベクトルLDC(Line-voltage Drop Compensator)方式の制御手法を開発した。また、低圧系統における電圧維持を目的としてLVR(Low Voltage Regulator)の利用を考え、計算コストの観点から一貫型GEMSの枠組みと親和性の高いデータに基づく判別問題としての定式化に基づくLDC制御パラメータの選択手法を開発した。また、これらの要素技術を組合せ、一貫したHEMS、及びGEMSの統合モデルのプロトタイプの構築を行った。

上記項目 B については汎用開発環境である MATLAB/Simulink を用いたシミュレーションモデルの構築を行い、計算機上で GEMS と HEMS を実装し、協調 EMS 手法の基礎検討を実施した。本シミュレーションモデルは、今後の研究展開を念頭において実施した FS において、様々な研究要素を評価するための実証基盤 Open CREST EMS Model として拡張し、FS 参加の各研究組織との連携の中で有用性を示してきた。また並行して、電氣的、通信環境共に自在に設計可能な配電系統模擬装置を導入することで早稲田大学にEMS模擬シミュレータの構築を行い、次世代電圧制御機器である LVR の導入効果及び、代表的な電圧制御方式を LVR に適用した際の電圧制御効果等、ハードウェア的な観点からの協調 EMS 実現手法に関する基礎検証を行った。

上記項目 C については模擬シミュレータを用いた協調 EMS 実現手法に基づくエネルギー管理の実用性評価を実施し、また計算機シミュレーションモデルを用いた PV 導入拡大量と需要抑制拡大量の2つの総合評価による協調エネルギーマネジメントの導入効果の評価体系を構築した。

また、上記項目 D ではこれらの評価のための枠組みを今後の研究展開に向けた FS の活動の中でさらに洗練、整理しながら利用し、対象とする様々なレベルの EMS における一次消費エネルギーやコストなどの種々の量を多面的、かつ俯瞰的に評価するための統合協調 EMS 基盤の今後の重要性を明らかにした。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1.

季節や時間、気象状況に大きく左右される再生可能エネルギーの不安定性、及び多様な利用機器や居住者行動に起因する需要の不確実性を考慮した電力変動を蓄積したデータに基づき予測を行い、その予測結果を家庭内の蓄エネルギー機器や空調設備、及び配電系統における電圧制御設備の運用計画に用いることで、需要家と電力ネットワークの間の双方向のエネルギーフローを考慮した予測・運用・制御一貫型の協調 EMS の技術体系を開発した。

2.

本研究で提案された予測・運用・制御の一貫型手続きに基づく EMS の方法論、及びその協調の効果は、同様に本プロジェクトの推進過程で構築された配電用変電所から住宅までのグリッドを一体型で模擬した計算機シミュレーションモデル、及び配電系統の模擬シミュレータから構成される世界でも類を見ない中立的かつ汎用的な協調 EMS 評価基盤を用いることでソフトウェア面、及びハードウェア面からの実用性が検証されている。

3.

本研究で開発された予測・運用・制御一貫型の HEMS/GEMS の枠組みは、これまでの EMS 技術に関する研究においてあまり類を見ない電力工学、情報工学、機械工学、建築学などの広範な分野の専門家同士の密な議論を経た異分野間の有機的な融合成果として得られた。実用化を念頭に置いた時に社会的に広範な影響を及ぼし得る分散協調型 EMS の基盤技術の研究開発において、多分野の知見が反映されているという観点から本研究は国際的にも先導的な試みと言える。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1.

新規創出された協調 EMS の実現手法の導入効果を中立的・学術的な視点から実験するため、配電系統の電力潮流の把握を目的とした計算機シミュレーションモデルの環境構築を行った。この計算機シミュレーションモデルは本チームが提案する方法論の評価のみならず、当該領域における他研究機関の開発技術の定量評価に際しても利用実績があり、今後の研究開発の深化に際して有用な汎用評価プラットフォームソフトウェアが構築されたと言える。

2.

新規創出された協調 EMS の実現手法の実用性を中立的・学術的な視点から実証するため、配電系統における電気的な特性の再現を目的とした模擬シミュレータの環境構築を行った。この模擬シミュレータは本チームが提案する電圧制御法の実証評価実績があり、当該領域における他研究機関の協調 EMS に関する開発技術の定量評価を電気的な観点から実施可能であることから、今後の研究開発の進化、および実用化に際して有用な汎用評価プラットフォームハードウェアが構築されたと言える。

3.

本プロジェクトで提案している予測・運用・制御一貫型の HEMS、GEMS の枠組みは、これまで本研究チームが別途実施してきている国際標準通信規格 ECHONET-Lite に準拠した HEMS による実エネルギー機器制御、および同じく国際標準通信規格 OpenADR2.0b に準拠した

GEMS による DR と電圧制御の実証試験とのリンクを見据えており、現実的な社会実装を念頭において開発されている。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 早稲田大学先進グリッド技術研究グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
林 泰弘	早稲田大学理工学術院	教授	H24.10～
若尾 真治	早稲田大学理工学術院	教授	H24.10～
村田 昇	早稲田大学理工学術院	教授	H24.10～
天野 嘉春	早稲田大学理工学術院	教授	H24.10～
田辺 新一	早稲田大学理工学術院	教授	H24.10～
長澤 夏子	早稲田大学理工学研究所	講師	H26.4～
光岡 正隆	早稲田大学スマート社会技術融合研究機構	研究員	H26.5～ H27.1
伊藤 雅一	早稲田大学スマート社会技術融合研究機構	准教授	H26.5～ H27.1
藤本 悠	早稲田大学ナノ理工学研究機構	准教授	H24.10～

研究項目

- ・ 協調 EMS 実現手法の構築
- ・ 協調 EMS 実現基盤体系の構築
- ・ 協調 EMS 評価体系の構築
- ・ シミュレーションプラットフォームを用いた協調 EMS の検証

(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

本研究プロジェクトでの活動を基盤の一環として、早稲田大学学内の重点領域研究機構の支援を得て立ち上げた「先進グリッド技術研究所」を研究組織の最上部とし、その下部組織として、学外共同研究を踏まえたテーマ別の複数のコンソーシアムを立ち上げ、複数の企業の参画を得ながら、研究活動や情報交換、人材交流等を積極的に進めてきた。

2011 年 11 月に設立したコンソーシアム「デマンドレスポンス技術研究会」では、電力の需要家側制御・デマンドレスポンスに関する国際規格の状況などを研究する目的で、ICT 系を中心とした 9 社の企業とともに活動を行ってきた。また、2012 年 8 月に設立したコンソーシアム「インフラライフ・フォーラム」では、インフラ系事業者・住宅メーカー、電機メーカーなど 14 社とライフスタイルの基盤となる住宅の在り方について研究を進めてきた。このような企業連携の一つの成果として 2012 年 3 月に経産省の実証事業である「エネルギーマネージメントシステム標準化における接続・制御技術研究事業」の事業主体として採択され、日本を代表する企業 25 社とともに、HEMS、デマンドレスポンスサーバーシステム、配電系統模擬システムなどからなる「EMS 新宿実証センター」設備の形成、及び、これらの設備を利用した実証を行っている。

上記のような産業界・省庁とのネットワークを軸に、先進グリッド技術研究所を中心とした 7 研究所に加え、インフラ系企業 17 社、および経産省と国交省がオブザーバ参加している「スマート社会技術推進協議会」、メーカー 14 社が参加する「スマート社会技術研究会」により構成された「スマート社会技術融合研究機構」を 2014 年 7 月に早稲田大学に設立し、より大きな産官学連携の枠組みを作りながら研究活動を行なっている。

§ 3 研究実施内容及び成果

3. 1 協調 EMS 実現手法の構築(早稲田大学先進グリッド技術研究グループ)

以下では HEMS と GEMS が協調する新しい EMS の実現手法を創出することを目的とした「協調 EMS 実現手法の構築」、「協調 EMS 実証基盤体系の構築」、「協調 EMS 評価体系の構築」、「シミュレーションプラットフォームを用いた協調 EMS の検証」の4つに関する実施成果を報告する。

A. 協調 EMS 実現手法の構築

本項目では協調 EMS のための一貫型エネルギー管理フローに基づく HEMS/GEMS の実現に向けて、それぞれに関する予測、運用、制御の各手法の開発、および統合評価を実施した。以下に各項目の実施内容を報告する。

(1)HEMS 実現手法

本項目では一貫型のエネルギー管理フローに基づく HEMS を実現するために、予測、運用、制御の各手法の開発、およびそれらの統合評価の実施を行なった。

1) HEMS 予測手法

本研究項目においては、太陽光(PV)発電量、及び負荷需要の予測手法を検証、評価するためのデータベースの構築を行い、局所的かつ非線形な構造を持つ電力量推移に対する予測手法を開発した。

提案する HEMS では宅内 PV 発電量予測、及び宅内負荷需要予測が重要となる。

まず、PV 発電量の予測システムとして

Just-In-Time (JIT) モデリングの構築を行った(図 2 参照)。これは、気象予報物理量データ(メソ数値予報モデル)、地点の緯度・経度から算出する太陽高度、日照時間の入力データと、過去に実測された PV 発電量の出力データから構成されるデータベースを集積し、この中から予測時の入力データと類似するデータを検索することで予測を行うシステムである。一般的な回帰式に基づく予測手法と異なり、JIT では過去の状況に応じた PV の発電実績に重点を置いたため柔軟性があり、様々な要因により変動する発電量の予測に対して有効性が期待される。この JIT と他手法との予測精度を比較し、PV 発電量の予測において有効な手法であることを明らかにした(図 3、図 4 参照)。

同様に、複数の家庭における負荷需要の内訳を含む詳細データ、および気象条件(天気予報)のデータベースを構築し、前日の負荷需要パターンと気象条件を用いて類似の事例を抽出する JIT モデルを利用した負荷需要予測システムを構築した。気象予測データやエネルギー消費量の履歴などの情報を入力データとし、将来の負荷需要を予測する問題に対して、一般的に用いられる線形回帰などの予測モデルを利用すると、人間の行動パターンに起因した負荷需要データが持つ突発的な出力の多様性を考慮することができず、予測に基づいて行う運用計画が脆弱なものとなる可能性がある。頑健で効率的な運用計画を行うには、予測データを複数出力することのできる

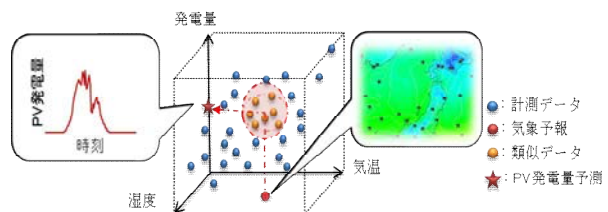


図 1: JIT 概念図

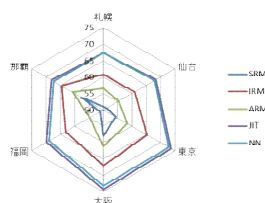


図 2: PV 発電量予測精度の比較

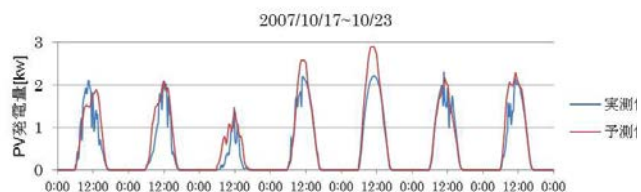


図 3: JIT による PV 発電量予測波形

システムが有効となる。HEMS における負荷需要予測では、人間の行動パターンの多様性を考慮した複数の現実的な予測波形の候補を出力することのできる K 近傍法を利用した JIT モデルを予測モデルとして利用した。JIT モデルでは過去に観測されたデータを格納したデータベースを用意し、現時点で得られている入力

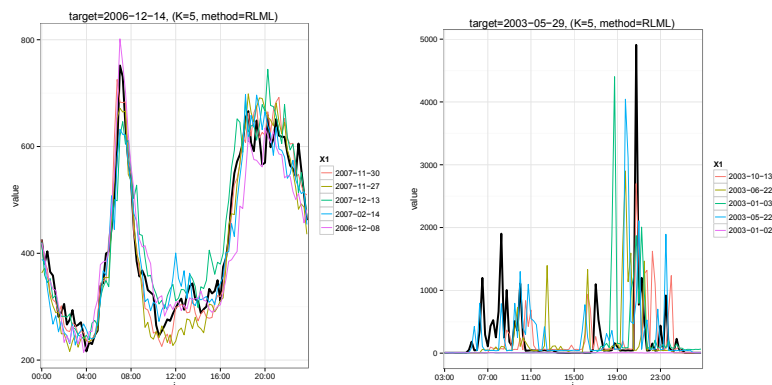


図 4: 負荷需要の予測と実測の例 (左図: 電力需要, 右図: 給湯需要)

データとデータベース内のデータとの間で計算される類似度を用いて翌日に観測されそうな複数個の予測波形を出力する。この際、これまで考慮されていなかったデータ同士の類似度計算を機械学習の分野で Metric Learning とよばれる手法によって学習することで、予測精度の向上を実現した。また、現実における複雑な問題設定に対応できるよう短いタイムスパンでの予測値の更新や、新しくデータが入力された時にモデルの再学習を可能にするなど柔軟なモデル設計を達成した。図 5 は電力需要と給湯需要について、シナリオ数 $K=5$ の場合の予測結果を示したものである。正解の傾向を捉えた予測が行われていることが確認できる。

図 6 に理想的な K 本のシナリオの内、何本正解を選択できるかという一致率を用いた予測手法毎の予測精度を示す。一般的なユークリッド距離に基づく選択よりも、提案する Metric Learning の枠組みを利用する提案手法(RLML: Regression-based Local Metric Learning)の予測精度が良いことがわかる。また、本提案手法は運用の観点から見た予測の外れ方の影響を陽に予測に反映させることが可能となる。図 7 は真値との二乗和誤差、および真値との総和の誤差が最小になるものを理想シナリオとした 2 つの状況における実験結果を表したもので、値が低いほど理想に近いシナリオを選択できていることを示す。図よりいずれの場合においてもユークリッド距離を用いて選択されたシナリオと比べて、Metric Learning を用いた本提案手法(RLML)の方が良好な性能を示していることがわかる。

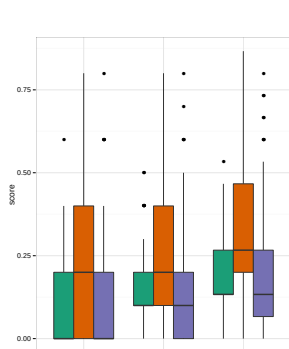


図 5: 近傍の正解率

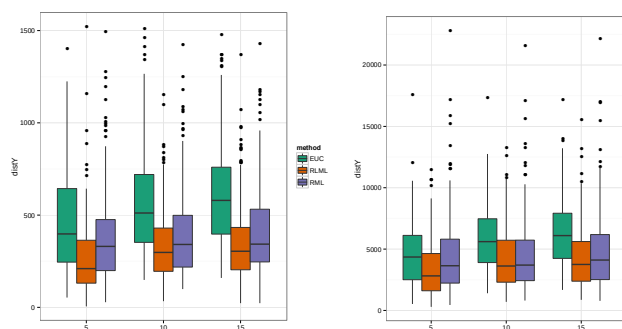


図 6: 予測誤差の評価 (左図: 二乗誤差和を指標とした予測, 右図: 負荷総和を指標とした予測)

2) HEMS 運用手法

家庭用エネルギーシステムの構成機器選択において、需要家には様々な選択肢が存在するため、それら代替機器の組み合わせから構成される全てのシステムを考慮する枠組みが必要である。家庭用エネルギーシステムの運用計画手法の開発に際しては、候補機器毎のエネルギー入出力特性をそれぞれ記述し、それら機器同士を接続することで、候補機器群からなる対象システムのスーパーストラクチャを図 8 の通り構築し、機器導入状況を表す論理変数を導入することで多様な機

器の組み合わせからなる家庭用エネルギーシステムの最適運用計画手法を開発した。構成機器には、燃料電池コージェネレーションシステム(FC)、ヒートポンプ給湯機(HP)、潜熱回収型ガスボイラ(CGB)、太陽光発電システム(PV)、定置式蓄電池(BT)、電気自動車(EV)、および電動式ルームエアコンディショナー(AC)、ならびに自動窓・断熱・日射遮蔽ブラインド開閉器を取り上げた。以下の本研究項目においては、**図 9** に示す通り FC・PV・BT・AC から構成されるシステムを対象として、提案する予測シナリオに基づいた最適運用計画手法の有用性を検証している。まず、運用方策の導出を目的とした最適運用計画問題の構築にあたり、機器毎のエネルギー入出力特性をモデル化するために、電力・給湯負荷を制御可能とした燃料電池 CGS 試験装置を構築した。同定された入出力特性を基に、FC を機能毎に幾つかのサブシステムに分割し、エネルギー収支および機器特性を制約とする最適運用計画問題を構築した。検討対象システムの最適運用計画問題においては、

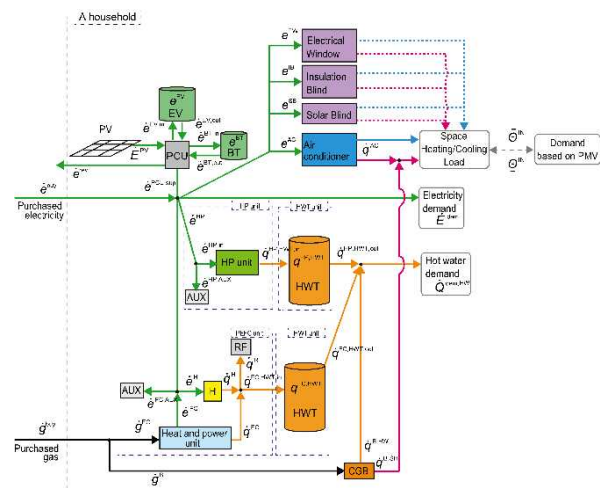


図 7: 家庭用エネルギーシステムのスーパーストラクチャ

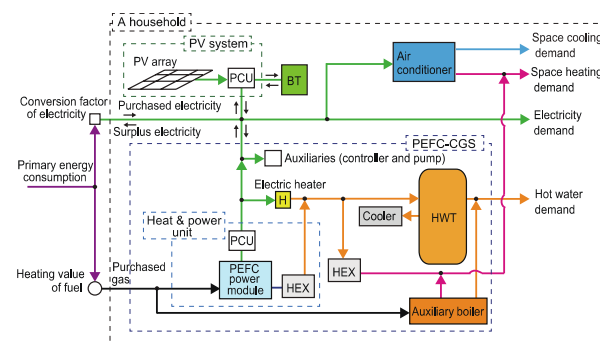


図 8: 検討対象システム

電力・給湯・冷暖房需要ならびに PV 出力は将来事象であるため、予測手法に基づき外生変数として入力する必要がある。この際、エネルギー需要および PV 出力の予測のずれに対して頑強な運用方策を導出するために、複数の予測シナリオに基づく確率計画法(SP)による定式化を行った。**図 10** は確定的・確率的手法の比較を示す。確率的手法は確定的手法と比較して、運用計画を要する FC-CGS からエネルギー供給量が減少し、運用計画の不要なボイラ・系統電力からのエネルギー供給量が増加するという保守的な運用方策となっていることがわかる。**図 11** に示す通り、将来の不確実性の大きさを示す予測シナリオ本数が増加しても、確率論的手法および確定論的手法の評価値の差はある一定範囲に留まっている。これは、確率論的手法において運用計画の必要な燃料電池ユニットの起動を抑えるという保守的な運用方策を採用することで、予測と実現値のずれを考慮していると言える。以上より、従来の確定的であった運用計画手法を確率計画法により拡張し、複数の予測シナリオに基づく運用計画手法を開発し、その有用性を確認した。

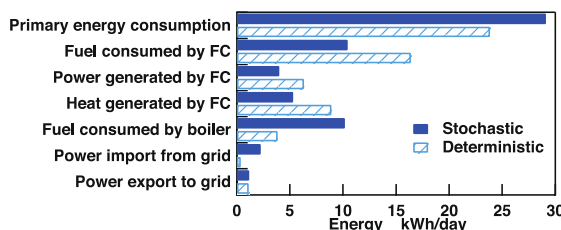


図 9: 確率的/確定的運用手法の比較

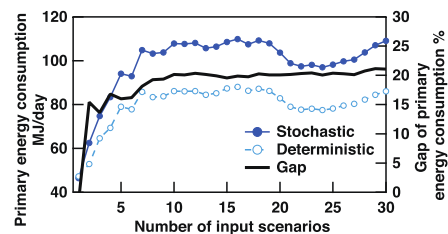


図 10: 使用する予測シナリオの数の影響

3) HEMS 制御手法

本研究項目では、省エネを実現しつつ、需要家が室内で快適に暮らせる制御として、需要家

の熱的快適性と省エネルギー性を両立した温熱環境制御手法を開発した。その上で、予測のずれや外乱といった要因により運用計画と実際の需要家の要求との間に乖離が生じた際に、普段の機器の利用傾向から機器制御の優先度を学習し、需要家の利便性と熱的快適性を考慮した自動機器制御の指針を定める手法を開発した。

人体の熱的快適性と省エネルギー性を両立した室内の温熱環境制御手法として、エアコン・窓・断熱ブラインド・日射遮蔽ブラインドの協調制御 algorithm の開発、及びシミュレーションによる検証を行った(図 12 参照)。本シミュレーションでは、時間断面ごとに熱容量質点系の室内熱負荷計算モデルを用いて室内の温度を算出した後、なるべくエネルギーを使わず室内における人体の熱的快適性が許容範囲内に収まるようエアコン・窓システムを協調制御し、電力消費量を算出している。人体の熱的快適性は、温度・相対湿度・放射温度・風速・代謝量・着衣量から非常に寒い(PMV=-3)から非常に暑い(PMV=+3)の7段階尺度で人体の温冷感を予測する予測温冷感申告 PMV を用いて評価している。シミュレーションでは実在するゼロ・エネルギー住宅を模擬して室内熱負荷計算モデルを実行し、エアコン・窓システムの制御をしない自然室温条件のもと、実測結果とシミュレーション結果を比較することで、室内熱負荷計算モデルの精度の高さが示された(図 13 参照)。本モデルにおいて、異なる地域・季節・熱的許容域でエアコンのみの単体制御とエアコン・窓システムの協調制御のシミュレーションを行った結果、いずれも単体制御に比べて協調制御では電力消費量を削減することが出来た(図 14 参照)。

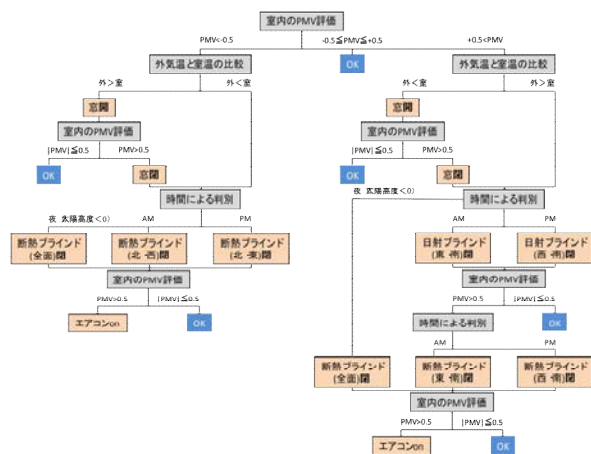


図 11: エアコン・窓システムの協調制御アルゴリズム

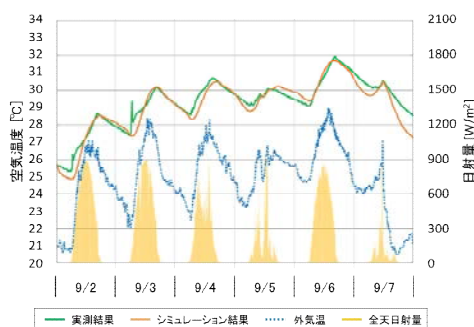


図 12: 実測結果とシミュレーション結果の比較

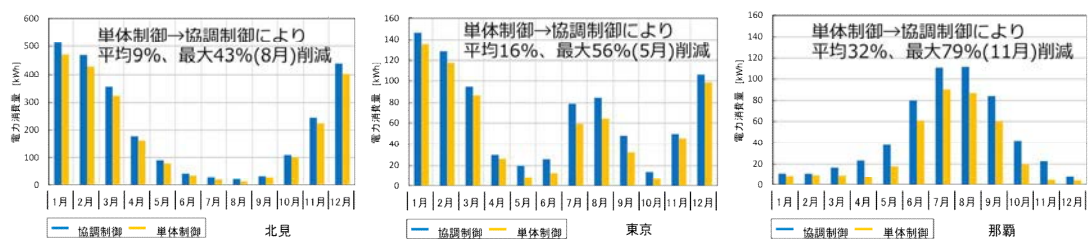


図 13: 単体/協調制御の月積算電力量の比較(左:北見, 中:東京, 右:那覇)

また、上記のような制御の枠組みを需要家にできる限り意識をさせずに行うために、宅内負荷機器の使用傾向をあらかじめ学習し、各需要家の生活に合わせた自動機器制御指針の提示 (personalization) を可能とする方法を提案した。機器の制御指針の学習では、様々な状況下での需要家の家電制御の履歴データに基づき条件付き確率を記述した統計モデルを学習する。例として時間帯別料金や直接負荷制御などの DR(Demand Response: 需要応答) の要請情報(時間帯別料金) が需要家宅に送られて来た際に制御の優先度の異なる需要家の家電機器の動作を推定した結果が図 15 となる。図 15 より、快適性を重視する需要家に対してはエアコンが常に稼動し電気料金が安い時間帯にも快適性を担保するような制御を行い、経済性を重視する需要家に対しては電気料金が安い時間帯においてエアコンの設定温度を変更し省エネを行っている様子が分かる。

また、建築学会公表の負荷データならびに気象庁公開データに基づき生成した1年分の人工データを用いて、季節別に学習期間に対する推定精度の向上の様子を評価した(図 16 参照)。これにより、夏季、中間期であれば2週間程度、冬季であれば1ヶ月程度の履歴データを用いた学習を経ることで実用的な personalization の枠組みの実現が期待できることが示された。

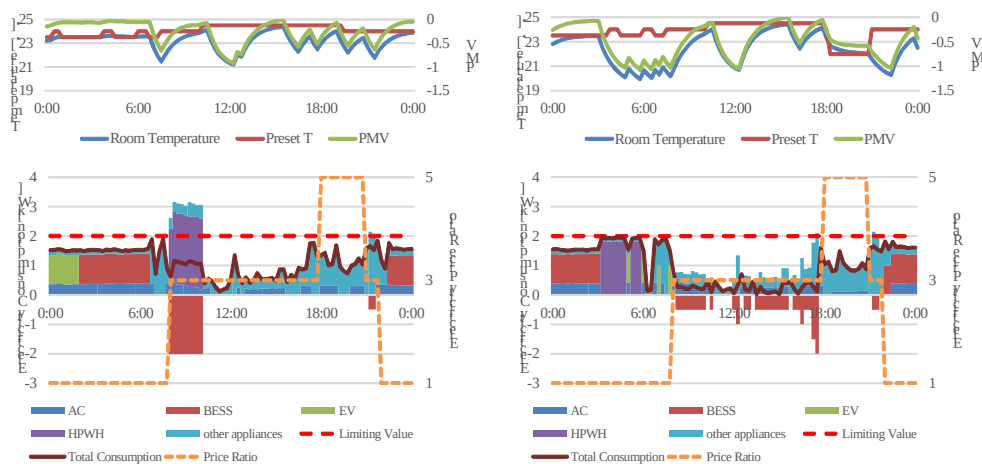


図 14: 時間帯別料金・直接負荷制御に対する需要家毎の宅内負荷機器制御例
(左:快適性・利便性を重視する需要家, 右:経済性を重視する需要家)

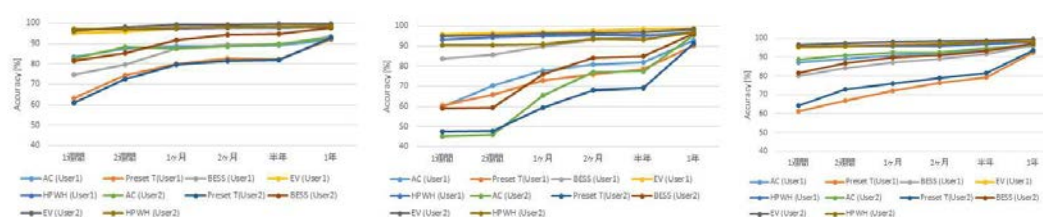


図 15: 学習期間による推定精度の季節別評価(左:夏季, 中:冬季, 右:中間期)

4) 統合 HEMS モデル構築

HEMS の予測・運用・制御を実行するスケジューリングのタイムラインを図 17 に示す。予測・運用・制御の 1 サイクルは 1 日周期で実行される。0~1 時の間に 3~27 時を予測し、1~2 時の間に 3~27 時の運用方策を計画し、2~3 時の間に HEMS-GEMS の協調に基づく再運用計画を実行する。3~27 時の間は最適運用計画問題において導出された運用方策に基づき制御を実行する。予測・HEMS 運用計画・HEMS-GEMS 協調再運用計画の各ステップには、それぞれ1時間の演算

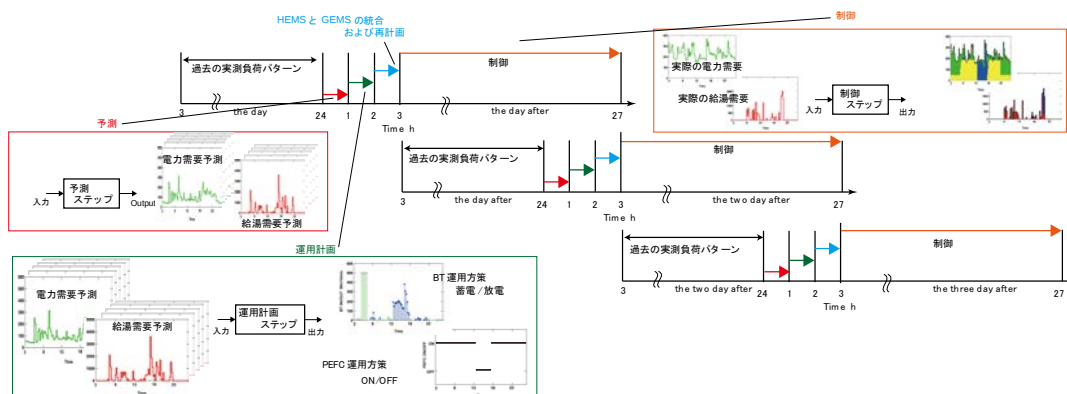


図 16: 予測・運用・制御のタイムライン

およびデータ通信時間を設けている。

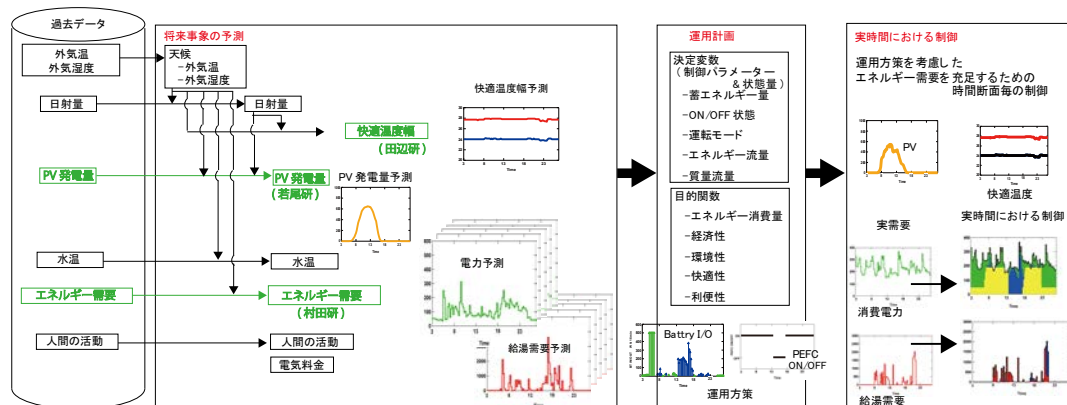


図 17: 予測・運用・制御に基づく HEMS のデータフロー図

前述した予測・運用・制御の各ステップ間において、通信されるデータを図 18 に示す。予測ステップにおいては、過去に蓄積された外気温湿度、日射量、PV 発電量、水温、負荷需要および人間の活動に基づき、翌日 3～27 時の室内の快適温度幅、PV 発電量および負荷需要を予測する。運用計画ステップにおいては、各種の予測値を外生変数として入力し、機器特性およびエネルギー収支制約の下で、省エネルギー性/経済性/環境性を最適化する翌日 3～27 時の運用方を導出する。図 19 は、予測をせず、ある単純な運用計画(従来手法)による運用費と、(2)で記した手法をもとに本研究で提案する予測・運用・制御の運用費を比較した結果である。対象とした24システムは、共通要素として AC、自動窓開閉器および断熱・日射遮蔽ブラインドを持つ。システム間の比較対象となる構成要素は、CGB、BT、EV、HP、FC、PV とした。図 19 に示すある 1 日の運用費は、時間帯別料金および PV-FIT を考慮した経済性最適化であり、運用費が負の値になるほど需要家にとって利得が高いシステムであることを示す。予測本数の観点では、CGB および PV+CGB において、即ち、蓄エネルギー要素を持たないシステムにおいては予測の有無が経済性へ影響を与えていないことを確認した。しかし、その他のシステムにおいては、経済性が向上しており、最大で約 85 円/日の削減が確認できる。図 20 には PV+BT+EV+FC+CGB から構成されるシステムの制御結果を示し、提案手法では時間帯別

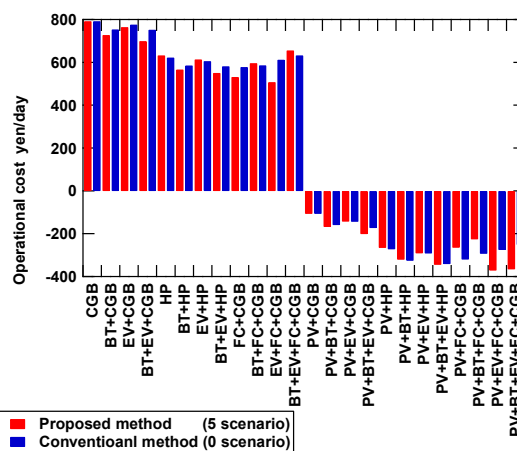


図 18: 各エネルギーシステムにおける予測有無に関する経済性評価

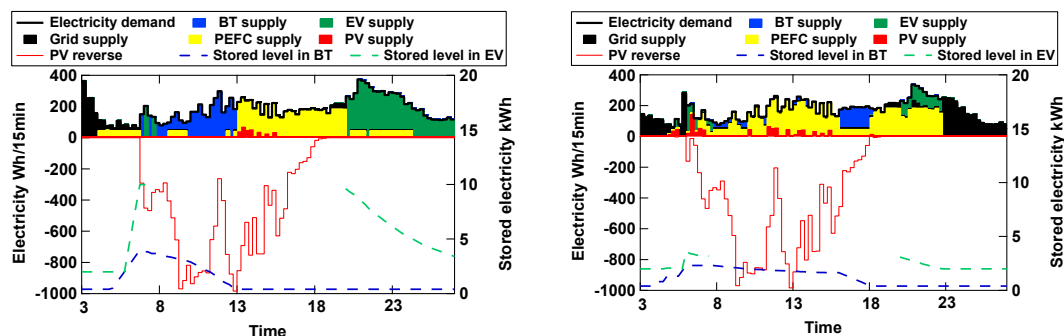


図 19: PV+BT+EV+FC+CGB における制御結果(左: 従来手法, 右: 提案手法)

料金ならびに PV 発電量・負荷需要予測シナリオに基づく運用方策を採用することで、制御ステップにおける BT の運用が改善され、従来手法と比較して経済性に優れる結果を得た。以上より、予測・運用・制御手法を統合した HEMS モデルを構築し、提案手法は対象としたほぼ全てのシステムにおいて、従来手法と比較して経済性の観点で予測値と実現値の変化にロバストであることを確認し、その有用性を確認できたと言える。

(2)GEMS 実現手法

一貫型のエネルギー管理フローに基づく GEMS を実現するために、予測、運用、制御の各手法の開発、およびそれらの統合評価の実施を行なった。本項目ではそれぞれの実施内容を項目ごとに報告する。

1)GEMS 予測手法

PV 発電量予測では、HEMS 予測手法として開発した JIT を、GEMS 運用手法でのニーズに対応する GEMS 予測手法として機能拡張を行った。これにより、運用上の要求事項に合わせた、様々な時間解像度と空間解像度の PV 発電量予測情報を提供可能にした。

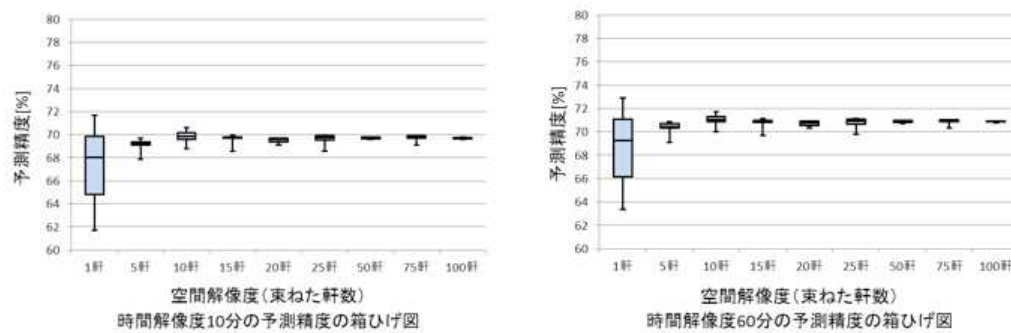


図 20: PV 発電量の時間・空間解像度と予測精度分布の関係

さらに、GEMS に用いる最良な PV 発電量予測情報に関する議論のため、PV 発電量の時間解像度と空間解像度に対して予測精度の観点からの検証、評価を行った(図 21 参照)。これによって、時間解像度が予測精度に影響を与え、空間解像度が予測精度のばらつきに影響を与えることを明らかにした。また、GEMS において PV 発電量の秒単位の急峻な変動が悪影響を与えるという解析結果を受け、これを補うための PV 発電量変動幅の予測情報を生成する機能を追加した(図 22 参照)。

また住宅向け負荷需要の複数の予測パターンが配電網側でどのような影響が出るかについても GEMS の運用・制御手法の開発グループと共同で実験的検証を行った。柱上変圧器単位、SVR 制御箇所単位、LRT 制御箇所単位、バンク単位で観測可能な住宅の負荷需要を予測対象とし、K 近傍法を利用した JIT モデルのデータベースからの引用精度の比較を行なったのが図 22 である。少数の需要家の負荷推移に対する予測を実施するよりも、ある程度多数の需要家の総負荷需要推移を予測することで、さらに適切な予測系列を引用することが可能となることが確認できた。

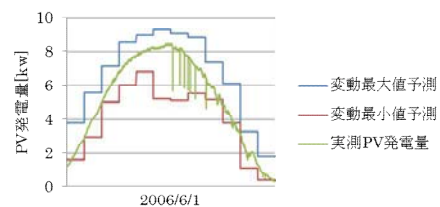


図 21: 幅を持った PV 発電量予測情報

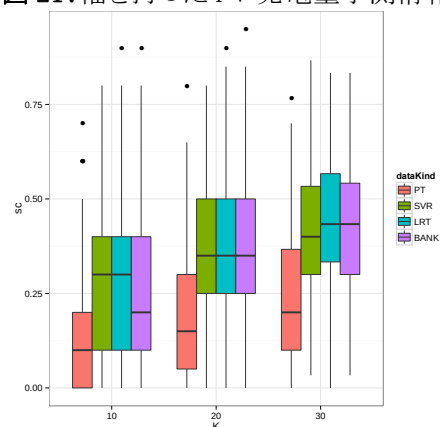


図 22: 配電系統上の各地点における提案手法の予測精度の推移の様子

2)GEMS 運用・制御手法

本項目では GEMS において考慮すべき家庭向け PV が多数連系された際の配電系統における電圧管理のための機器運用、制御手法の開発を行った。配電系統における電圧変動の特徴は高圧需要家や多数の低圧需要家で構成される高圧系統と少数の低圧需要家で構成される低圧系統では異なるため、高・低圧系統ではそれぞれの電圧変動に対して適切な電圧制御機器、および電圧制御機器の仕様を考慮した電圧制御手法が必要である。そこで、負荷時タップ切換変圧器 (LRT: Load Ratio control Transformer)と自動電圧調整器 (SVR: Step Voltage Regulator)を対象とする高圧 GEMS 手法、および自動タップ切換器付柱上変圧器 (LVR: Low Voltage Regulator)を対象とする低圧 GEMS 手法を開発した。なお、LRT・SVR・LVR の電圧制御方式にはベクトル電圧降下補償器 (LDC) 方式を統一して採用し、GEMS 運用・制御手法では、ベクトル LDC 方式の制御パラメータ (V_{ref} , L)を1時間毎に更新することで配電系統内の電圧逸脱量・PV 出力抑制量の削減を図る。

高圧 GEMS 手法では、**図 25**に示すような過去の実測値をもとに構築したデータベース活用して決定するシステムを開発した。高圧系統には多数の需要家が存在し、PV 発電量・負荷需要の予測精度によってはパラメータの決定に膨大な時間を要すること、不適切なパラメータが選択されるという課題が懸念される。データベース構築の目的は、予測・運用・制御の枠組みにおいて、予測として得られる PV 発電量・負荷需要に対して適切なパラメータを対応付けすることである。データベースには、1 時間毎に生成される PV 発電量・負荷需要予測、ならびに対応する時間帯の実測 PV 発電量・負荷需要より算出した電圧逸脱を回避できる全てのパラメータ候補を格納する。今後1時間のパラメータを決定する際には、まず(i)今後1時間分の PV 発電量・負荷需要を予測し、次に、(ii)今後1時間の予測結果とデータベース上に保存されている過去に実施した予測結果との比較から、類似した予測結果を出力した時間帯を探索する。最後に、(iii)そのような時間帯において電圧逸脱を回避可能な制御パラメータの中から、共通するパラメータを選び、今後1時間のパラメータとして指令する。

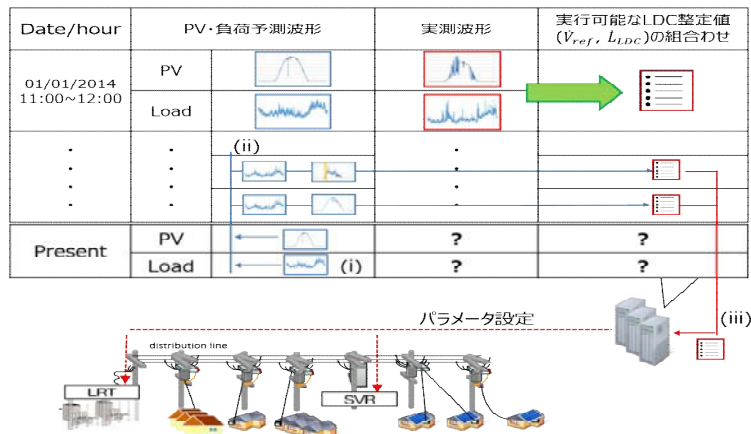


図 24: 実測値データベースを活用した LDC パラメータ決定手法の概念図

一方、低圧系統では、機械学習やパターン認識の分野で用いられる判別器を活用してパラメータ決定を行う低圧 GEMS 手法の開発を行った。低圧 GEMS 手法の特徴は、過去の実測値に対して任意の制御パラメータが適切か否かを予めオフラインで学習した判別器を用いることにより、高速に制御パラメータの適切性の判別が可能であり、また、判別確率が上位少数のパラメータに対して

のみ潮流計算(PFC)を実施して厳密な評価を行うことにより、高精度な制御パラメータを決定できることである。なお、判別器にはランダムフォレスト(RF)を用いた。低圧 GEMS 手法(RF+PFC)の検証では、パラメータ決定精度(図 26)、パラメータ決定に要する計算時間(図 27)、及び導出されたパラメータを用いて LVR による電圧制御を行った結果(図 28)に関して従来手法(PFC:高精度・低速、RF:低精度・高速)との比較を行った。図 26 より RF+PFC は RF より高いパラメータの決定精度を得られていることが確認できる。図 27 より RF+PFC は PFC より大幅に計算時間を削減することが可能であり、RF との計算時間には大差がないことが確認できる。図 28 より RF+PFC は PFC とほぼ同等の日数で電圧逸脱を回避することができており、また RF より大幅な日数の増加が確認できる。以上の結果から、提案手法では高速かつ高精度に LVR の電圧制御パラメータを決定できていることが確認できた。

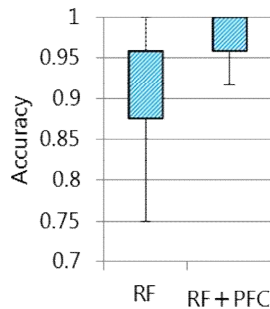


図 25: パラメータ決定精度

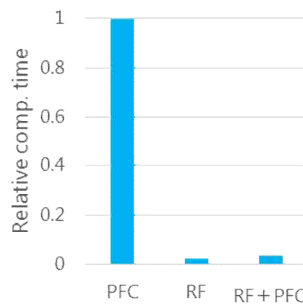


図 26: パラメータ決定に要する
計算時間

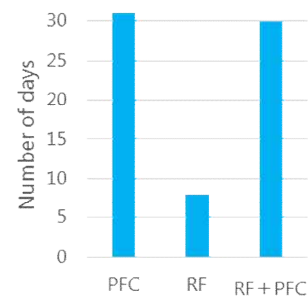


図 27: 電圧逸脱回避日数

3) 統合 GEMS モデル構築

本研究項目においては、GEMS における予測・運用・制御のそれぞれを組み合わせ、一貫した統合 GEMS モデルを構築し、シミュレーションと実験による検証を行った。

図 28 に統合 GEMS モデルの枠組み、図 29 に統合 GEMS におけるデータフローを示す。予測フェーズでは、 $t = 1, \dots, T$ の制御フェーズにおける 15 分刻みの PV 発電量と負荷需要の予測を行う。必要となる予測の対象範囲は高・低圧系統で異なり、高圧系統(LRT・SVR)用には柱上変圧器以下の需要家を集約した波形、低圧系統(LVR)用には各需要家の波形を予測する。運用フェーズでは、予測として得られる PV 発電量、負荷需要を活用し、前述の 2) で記述した方式により電圧制御機器(LRT・SVR・LVR)の制御パラメータを決定し、1 時間ごとに更新する。制御フェーズでは、電圧制御機器が更新されたパラメータに従いベクトル LDC 方式に基づき自律制御を実施する。統合 GEMS モデルの結果は、次項 C に示す。

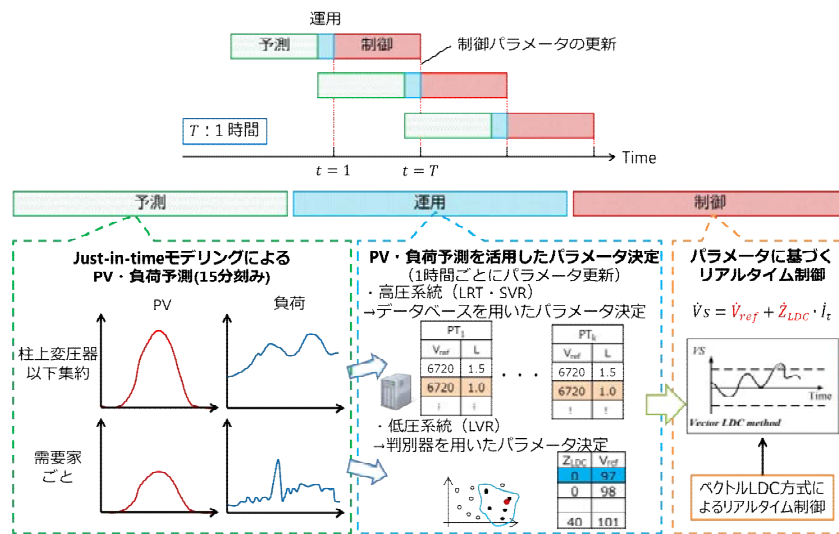


図 28: GEMS における予測、運用、制御一貫型電圧管理の枠組み

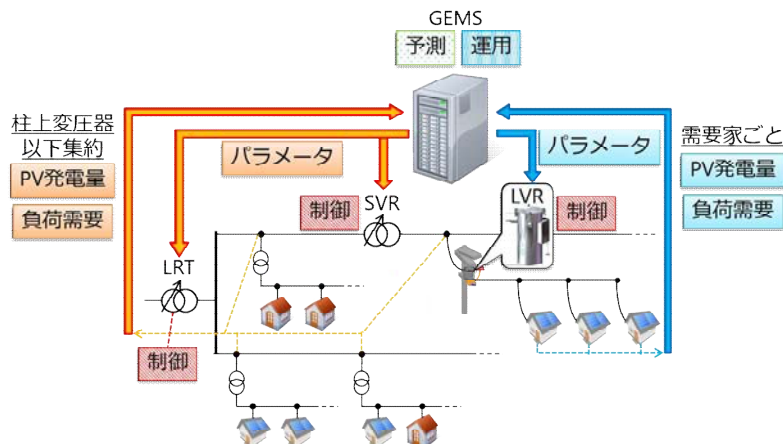


図 29: 統合 GEMS モデルにおけるデータフロー

(3) 協調 EMS 実現手法の構築

HEMS、及び GEMS の協調動作に基づく PV 導入量、ピーク需要抑制量の拡大を実現するような協調 EMS を実現するための方法論について検討を開始し、計算機上に構築した協調 EMS シミュレーションモデル、及び配電系統における電氣的な振る舞いを検証可能な EMS 模擬シミュレータの構築を行うという当初の計画を達成した。

協調 EMS 実現手法では、予測・運用・制御の流れで構成された GEMS と HEMS が電気料金や消費電力といった形でのデータ通信を行うことで PV 導入量、および需要抑制量の最大化を図る。図 31 に協調 EMS 実現手法のデータフローと概念図を示す。HEMS では、GEMS からの節電要請や電気料金プランなどの DR 信号に基づき、一次エネルギー消費量最小化を目的とした HEMS 機器の最適運用方策を決定する。しかしながら、日中の消費電力を削減した場合には、PV からの逆潮流増加し、受電点電圧の上昇や HEMS 運用計画時には想定しない PV 出力抑制が発生する可能性がある。そこで、GEMS においては、消費電力、PV 逆潮流量を HEMS からデータ形式で受け取っているため、過去の HEMS 制御の傾向を捉えた PV・負荷予測を行うことで電圧逸脱を防止しつつ PV 出力抑制量の削減を可能とする電圧制御を行う。これにより、配電系統での PV 導入量拡大 (PV 出力抑制量の削減)、および需要抑制量の拡大 (一次エネルギー消費量の削減) が可能となる。なお、協調 EMS 実現手法の検証結果は項(c)に記述する。

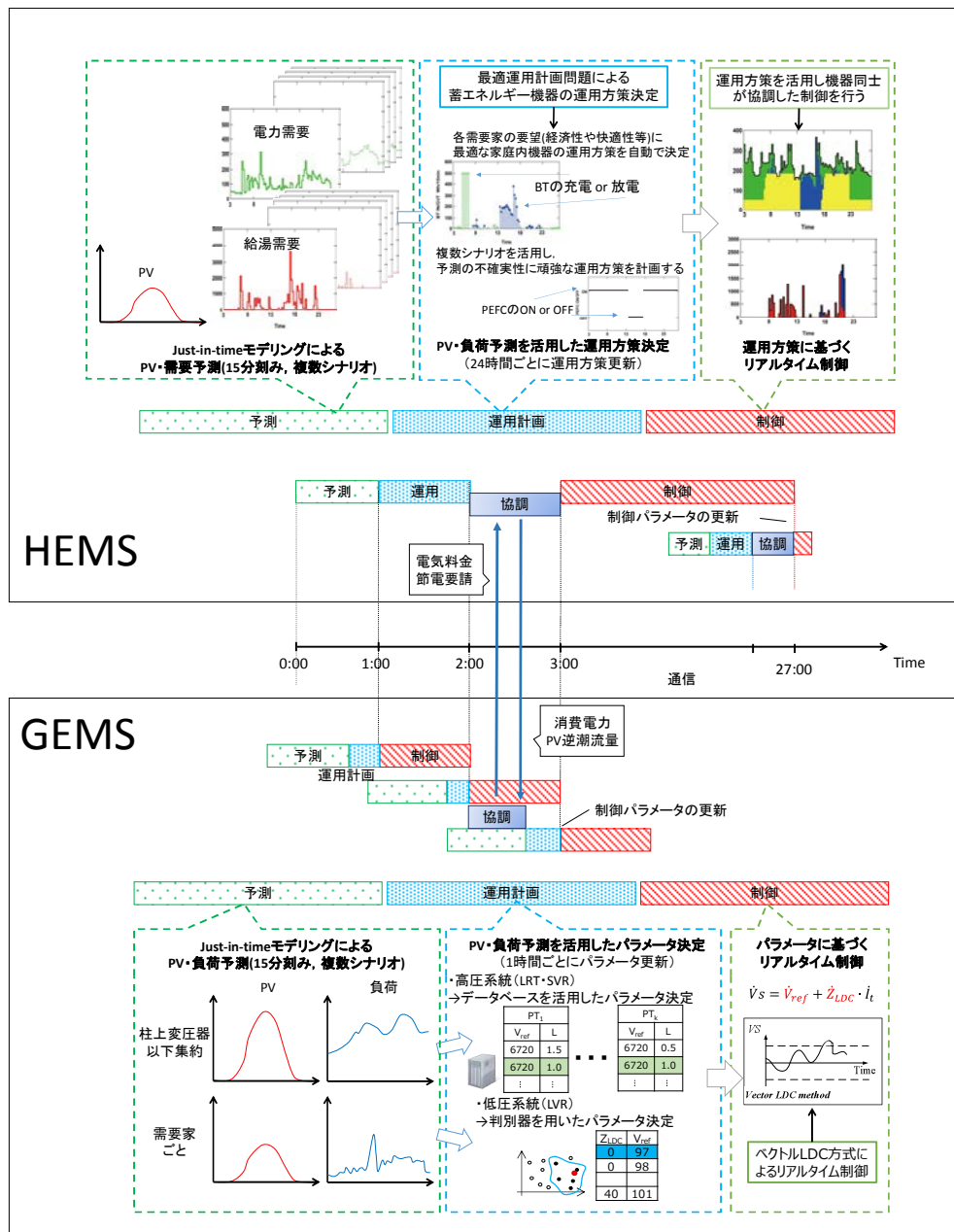


図 30: 協調 EMS 手法のタイムラインと概要

B. 協調 EMS 実証基盤体系の構築

1) 協調 EMS シミュレーションモデルの構築

本研究項目では、協調 EMS シミュレーションモデルの構築及び統合 EMS モデルの検証を実施した。図 32 に構築した協調 EMS シミュレーションモデル(以下、Open CREST EMS Model)を示す。本 Open CREST EMS Model モデルは、電気協同研究第 66 巻第 1 号「配電系統における力率問題とその対応」における全国の電力会社の実系統 223 配電線を対象とした調査、測定をもとに、高圧配電線から引き込み線、住宅一軒までの実配電系統を詳細模擬した数千軒規模の計算機シミュレーションのプラットフォームである。構築した Open CREST EMS Model は、2 つの工業地区と 4

つの住宅地区を模擬しており、需要家数や電圧制御機器数などの配電線別の特徴を活かしたシミュレーションモデルである。Open CREST EMS Model では、汎用ツールである MATLAB/Simulink や csv ファイルといったデータ形式により GEMS と HEMS の制御ロジック、ならびに制御結果を実装することができ、かつ配電システムレベルでの PV 導入量、需要抑制量などの観点から、開発するエネルギー管理手法の効果を定量的に評価できることが特徴である。FS では、データ形式や制御ロジックなどのインターフェースの調整を実施し、他研究機関への Open CREST EMS Model の提供を行った。GEMS・HEMS 実装の例として、住宅地区モデル図 33 を示す。

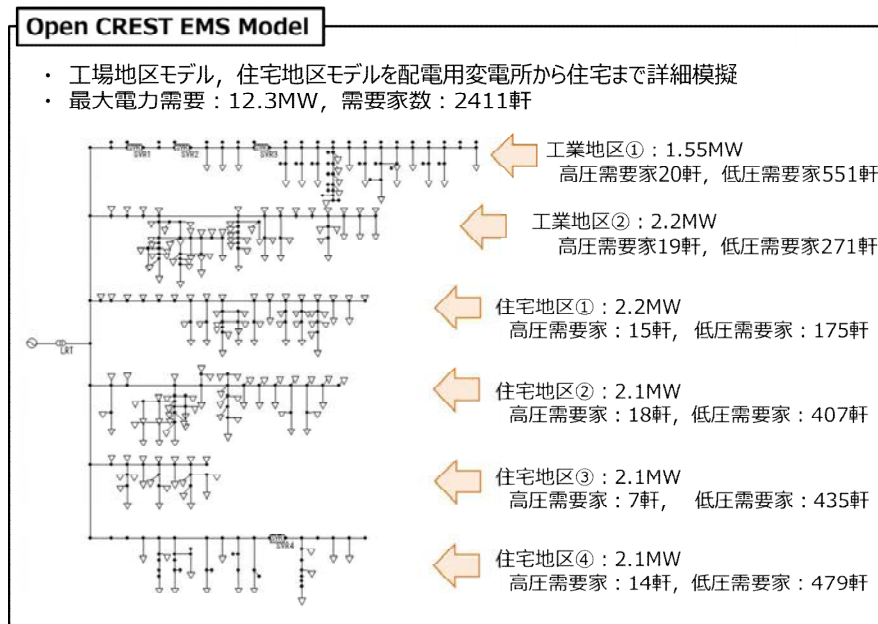


図 31: Open CREST EMS Model

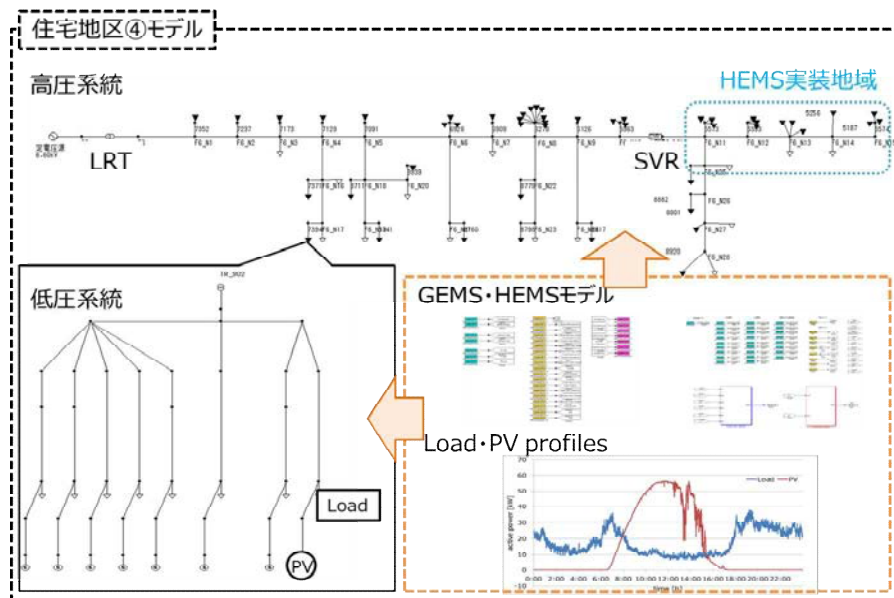


図 32: 住宅地区モデル

2) 協調EMS模擬シミュレータの構築

協調 EMS 実現手法の妥当性・有効性をハードウェアレベルで検証するため、実験実証が可能となる汎用的な EMS 模擬シミュレータの構築を行った。図 33 に構築した EMS 模擬シミュレータ

の構成例を示す。EMS 模擬シミュレータは、配電用変圧器から引き出された 6.6kV の三相 3 線式高圧配電線 1 回線を、400V の三相 3 線式(非接地)でスケールダウンして模擬している。本シミュレータの構成機器は、自動電圧調整器(AVR)、高低圧配電線路模擬装置、高圧電圧制御機器(SVR)、次世代低圧電圧制御機器(LVR)、負荷・PV 等模擬装置(三相・単相インバータ)、通信制御装置(dSPACE)であり、各配電系統模擬装置を電氣的に自由に接続することにより、多様な配電系統構成を模擬することができる。

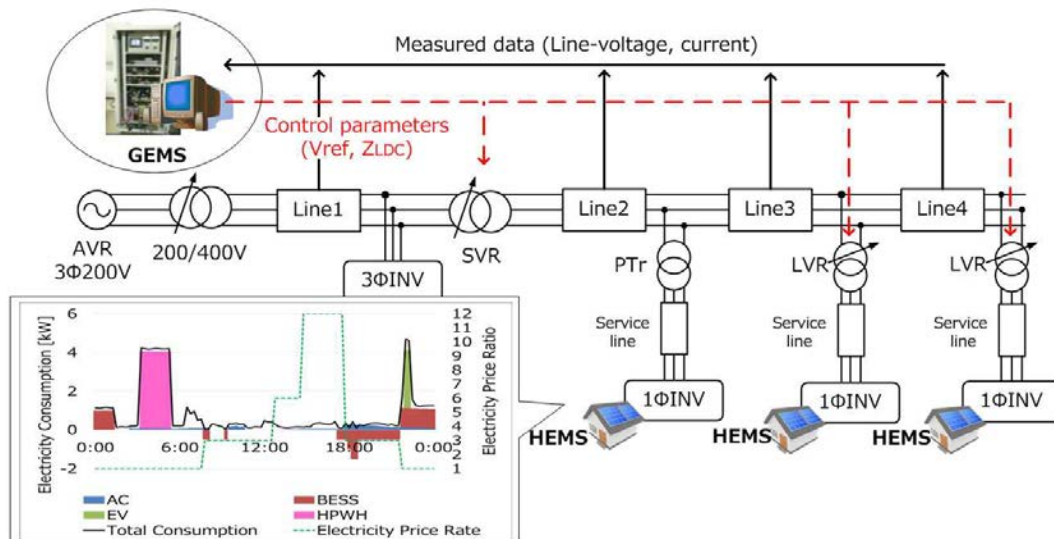


図 33: EMS 模擬シミュレータの実験構成

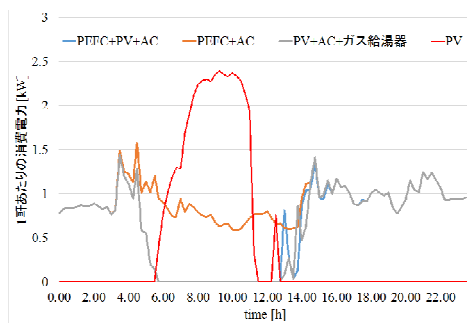
C. 協調 EMS 評価体系の構築

本 CREST では提案する GEMS と HEMS の協調 EMS 実現手法を、構築した Open CREST EMS Model および EMS 模擬シミュレータのソフト・ハードの二つの環境において、電圧逸脱量・PV 導入拡大量(PV 出力抑制削減量)、需要抑制拡大量(一次エネルギー消費削減量)の観点から定量的に評価することで協調 EMS 実現手法の導入効果の評価体系を構築した。

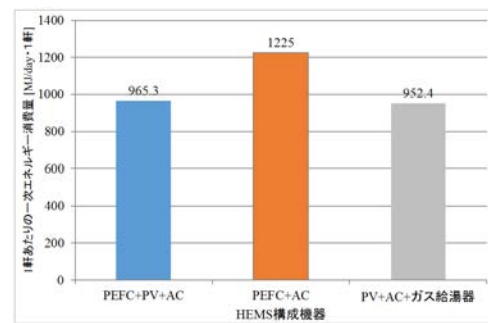
(i) 計算機シミュレーション(Open CREST EMS Model)による協調 EMS 実現手法の導入効果

協調 EMS 実現手法として、予測・運用・制御の一貫した HEMS 実現手法と GEMS 実現手法を Open CREST EMS Model の住宅地区モデルに実装し、導入効果を評価した。HEMS 実現手法では、HEMS 機器構成として PV+PEFC+AC、PEFC+AC、PV+AC+CGB の 3 ケースを想定し、各ケースにおいて需要抑制拡大量(一次エネルギー消費削減量)を評価するとともに、GEMS と同時シミュレーションを実施した際に、HEMS だけでは想定できない PV 出力抑制がどの程度発生するのかを確認した。一方、GEMS 実現手法では、年間の実測値データベースを活用した電圧制御により、電圧逸脱量、PV 導入拡大量(PV 出力抑制削減量)がどの程度改善できるか確認した。

協調 EMS 手法における HEMS 実現手法の制御結果例を図 35 に示し、GEMS 実現手法の制御結果例を図 36 に示す。協調 EMS 手法により、一次エネルギー消費量の削減、および配電系統内の電圧逸脱を回避することが可能であるとともに、PV 出力抑制量の削減が可能となっていることが見て取れる。言い換えれば、協調 EMS 実現手法により、目的とする需要抑制量の最大化と PV 導入量の最大化が可能となったと言える。

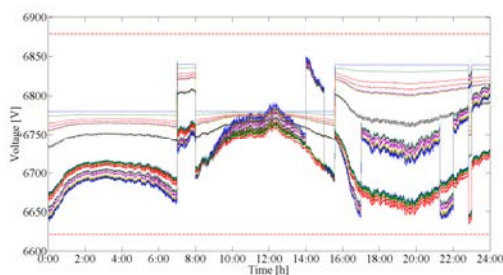


(a) HEMS による消費電力波形

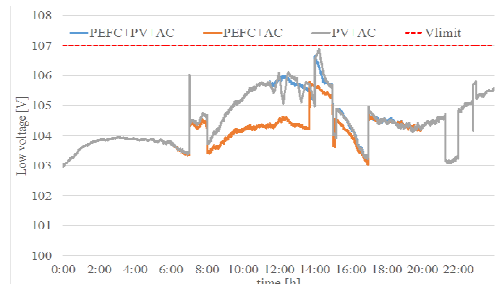


(b) 一次エネルギー消費量

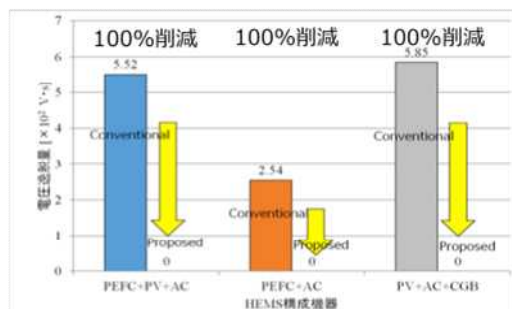
図 34: 協調 EMS 手法における HEMS 実現手法の制御結果



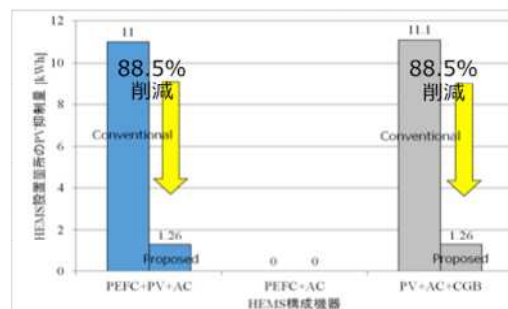
(a) 高圧系統電圧分布



(b) HEMS 設置地点の低圧系統電圧分布



(c) 高圧系統電圧逸脱量

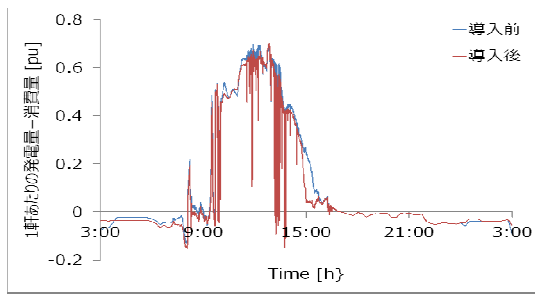


(d) HEMS 設置地点の PV 出力抑制量

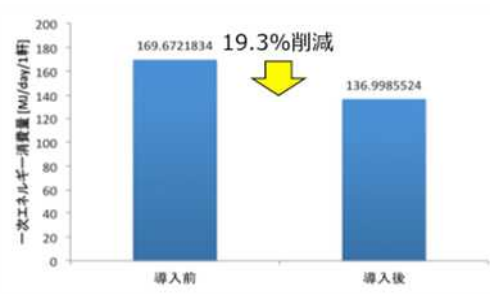
図 35: 協調 EMS 手法における GEMS 実現手法の制御結果

(ii) EMS 模擬シミュレータによる協調 EMS 実現手法の導入効果

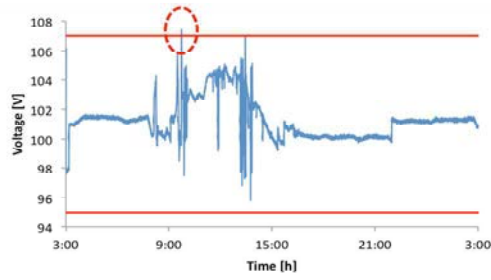
協調 EMS 実現手法として、予測・運用・制御の一貫した HEMS 実現手法と GEMS 実現手法を EMS 模擬シミュレータに実装し、導入効果を評価した(図 37 参照)。HEMS 実現手法では、HEMS の構成機器として PV+PEFC+AC+CGB を想定し、手法導入前後における需要抑制拡大量(一次エネルギー消費削減量)を評価し、手法導入による需要抑制拡大量の増加を確認した。また、HEMS、GEMS を EMS 模擬シミュレーションに同時実装した実証実験により、GEMS 実現手法導入前後における電圧制御結果を比較し手法導入により電圧逸脱の回避が可能であることを確認した。一方、今回の実験では PV 出力抑制は見受けられなかったが、電圧逸脱の回避は PV 導入量の増加に繋がると言える。



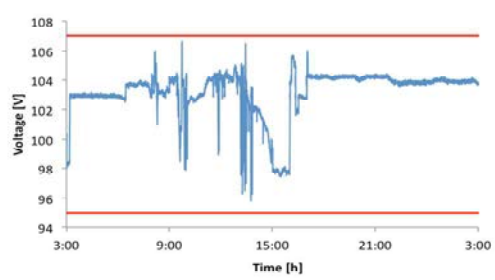
(a) HEMS 結果 (PV-負荷合成波形)



(b) 一次エネルギー消費量



(c) 低圧系統電圧分布 (導入前)



(d) 低圧系統電圧分布 (導入後)

図 36: HEMS/GEMS 実現手法導入前後における電圧制御

D. シミュレーションプラットフォームを用いた協調 EMS の検証

(1) 検証実験実施方針の検討

本実施内容では衛星観測物理量や住環境に応じた多様な需要パターンなどの情報の有用性の確認や HPWH、PHV などに代表される多様なエネルギー機器の工学的な性質を考慮した数理モデルの検証、および電力価格に対する需要の変化やサイバー攻撃への対処などに関する多分野における取り組みが重要なことを踏まえ、これらについて相補的な知見の共有に基づく新たな EMS 技術の開発を期待し、平成25年度、平成26年度において林チームが実施した CREST FS の中で多分野にわたる研究機関と図 38 に示すような連携を検討した。検討の結果、汎用的な系統シミュレーション基盤の整備と構築を進め、配電系統における電圧制御の観点から各グループが提供するデータの有用性や、エネルギー管理のための数理モデル・ロジックなどの検証を行うことに主眼を置き、経済学的な評価が伴う協調 EMS の在り方やサイバー攻撃への対処などの考慮すべき問題を共通の枠組みで評価検証するための基盤構築を目的として、下記項目を実施した。

- ① 事故時復旧のための衛星観測日射情報の取得の有効性の検証(中島 T)
- ② 系統電圧を考慮した PHV・PV 付設住宅における HEMS 運用の検証(鈴木 T)
- ③ サイバー攻撃の系統電圧制御への影響の検証(石井 T)
- ④ 協調 EMS のための HPWH 付設住宅向け HEMS モデルの検証と評価(馬場 T)
- ⑤ 価格調整型 DR に対する需要変化の PV の出力抑制への影響評価(大橋 T)
- ⑥ 需要シミュレーションに基づくシナリオベースの系統電圧への影響評価(下田 T)

各研究チームの卓越した方法論やデータの知財を守りつつ、共通プラットフォーム上で、研究チーム同士で相互にどのようなデータをやりとりするかのインターフェース部分を相互の研究チームの方法論やノウハウを持ち寄って検討した。また、本研究チームと他の HEMS 研究チームとで、1ファイダの簡単な共通 EMS プラットフォームモデル(GEMS+HEMS)を商用の汎用的ソフトウェアである MATLAB/Simulink をベースに試験的に構築・共有し、GEMS の方法論と HEMS の方法論を実装し、計算機シミュレーションによりモデルの有用性を検証した。本項目で検討した本研究チーム(早大 林チーム)と他の研究チームとの研究連携の模式図を図 38 に示す。

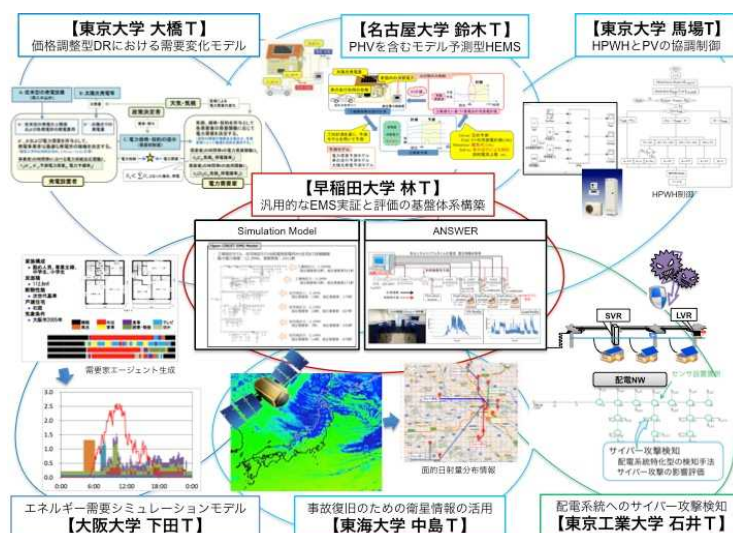


図 37: 提案 FS における連携の概要

(2) シミュレーションに基づく検証実験

- ① 事故時復旧のための衛星観測日射情報の取得の有効性の検証

衛星データを活用した空間的粒度の細かい PV 出力の見積もり、日射量・PV 発電量の短期予測が実現されることで、平常時の電力系統の運用能力向上や PV 解列を伴う事故発生時の速やかな復旧等への貢献が期待できる。本 CREST FS では、PV 発電が大量導入された電力系統を想定

し、東海大学中島チームが提供する面的日射量分布に関する衛星データを用いることによる電力系統の電圧制御の改善可能性を検証した。

実地図上にマッピングされた配電系統モデルにおいて、PV 解列を伴うような配電事故が発生した際に、PV 解列に伴う急峻な電圧変動に対して、高空間分解能をもつ衛星データを用いることによる電圧制御の改善可能性を検証した。PV 解列による電圧変動幅を見積もるには、事故時の日射量から PV 発電量を推定することで達成できるが、配電線上の日射量は地点によって大きく異なる場合があるため(図 39)、低空間分解能の日射量情報を用いると、配電系統内の電圧を正確に推定できない恐れがある。そこで、日本国内 1km² 間隔の高空間分解能を有する衛星日射量データを利用し事故復旧を行った場合と、変電所に設置した日射量計のデータのみを利用し事故復旧を行った場合の、事故復旧プロセス中の電圧制御結果を比較した(図 40)。

衛星日射量データを使用した事故復旧では PV 解列に伴う電圧逸脱をあらかじめ想定でき、電圧逸脱発生前に制御器を動作させることで、電圧逸脱を回避した。一方で、1点の日射量計情報のみを利用した場合は、面的な PV 発電が把握できず、PV 解列後の電圧逸脱を想定できず、制御機器が動作しなかったために、電圧逸脱が発生した。

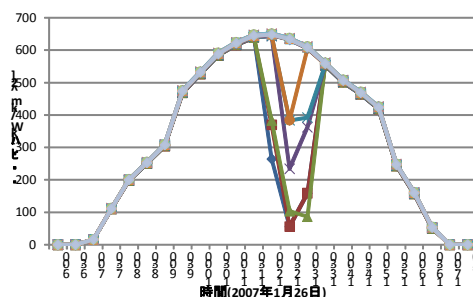
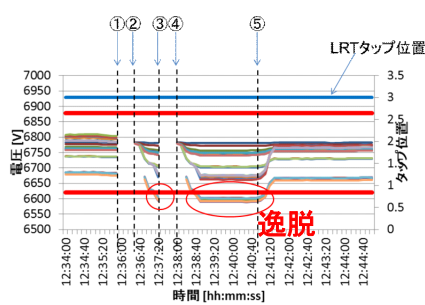
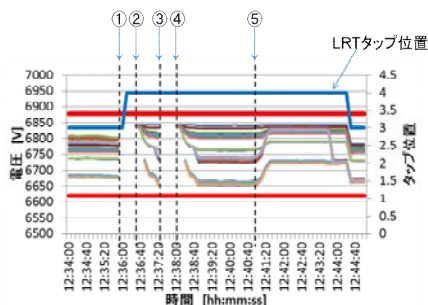


図 38: フィーダ内の各地点の日射量変化

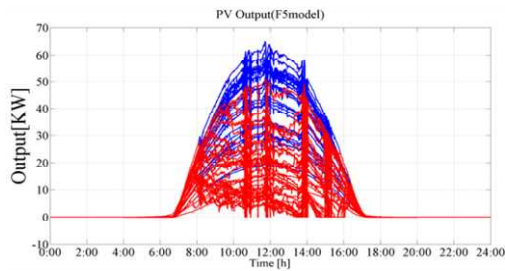


(a) 衛星日射量データを利用した事故復旧 (b) 1点の日射量計データを利用した事故復旧
図 39: 電圧制御結果

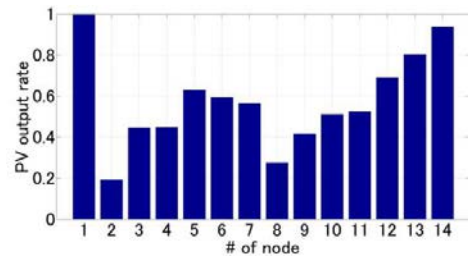
② サイバー攻撃の系統電圧制御への影響の検証

現在、配電系統へのセンサ内蔵開閉器(以下、センサ開閉器)の導入が進められており、今後はこれらの計測情報を活用した集中型電圧制御手法が次世代圧制御手法として期待されている。しかしながら、サイバー攻撃によりセンサ開閉器情報が改ざんされるなどのリスクも伴っており、そうした場合には適切な電圧管理が行えなくなる可能性がある。そこで、東工大石井チームとは、林チームが構築した **Open CREST EMS Model** を用いて、配電系統へのサイバー攻撃検知アルゴリズムの検証、およびサイバー攻撃が系統電圧制御に与える影響の評価を実施した。

サイバー攻撃検知アルゴリズムの検証では、配電系統上のセンサ開閉器設置箇所の計測電圧情報が改ざんされる状況を仮定し、想定する電圧制御方式を用いる際には、どのような状況下でどのような改ざんが可能かを検討することにより、電圧異常箇所の検知アルゴリズムの提案・検証を行った。検証の結果、開発した簡単な攻撃検知アルゴリズムにより、一定程度のサイバー攻撃は検知できることが判明し、改ざんのケースによっては電圧制御機器の誤動作を発生させ、配電系統に故意に電圧逸脱を生じさせることができることが判明した。一方、サイバー攻撃が系統電圧制御に与える影響評価では、電圧逸脱量のみではなく、PV 出力抑制量を評価項目に加え、より実際に即した観点からの評価も実施した。PV 出力抑制機能を追加したことにより、PV 出力抑制なし時には発生していた日中の電圧上限逸脱が回避される反面、各ノードで PV 出力抑制が発生し、計測電圧情報が改ざんされるセンサ開閉器数が PV 出力に影響を与えることが確認できた(図 41)。



(a) PV 出力抑制状況



(b) 各ノードの PV 出力抑制率

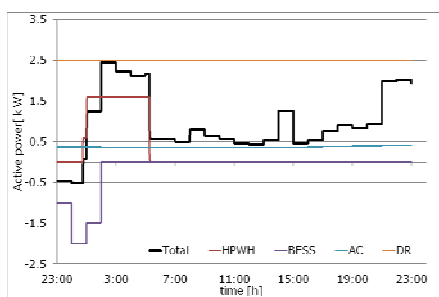
図 40: サイバー攻撃による PV 出力抑制時発生状況

③ 協調 EMS のための HPWH 付設住宅向け HEMS モデルの検証と評価

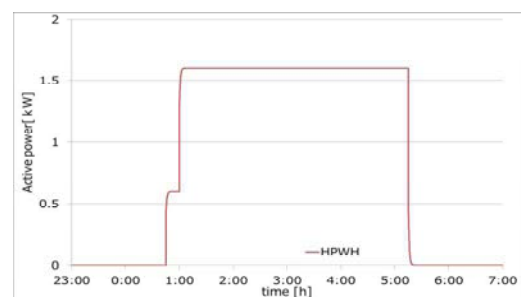
東大馬場チームは実機特性を反映させた HPWH (Heat Pump Water Heater) モデルを開発しており、本 FS では馬場チーム構築の HPWH モデルを活用した連携研究を実施した。平成 25 年度には、Open CREST EMS Model の代表的な配電線において、HPWH・PV 協調制御手法による PV 大量導入時の系統電圧上昇対策手法の有効性の検証を実施し、平成 26 年度には、HPWH 付設住宅向け HEMS モデルの検証を実施した。

系統電圧上昇対策手法の検証では、PV が大量に導入された配電系統を想定し、本チームが構築した電圧制御手法と東大馬場チームが構築した HPWH・PV 協調制御手法を同時に実装することにより、提案手法の有効性を実配電系統レベルで評価した。シミュレーションに基づく検証の結果、東大馬場チームが開発した HPWH・PV 協調制御手法により、低圧配電線での電圧上昇を緩和することができ、その有効性が確認できることを確認した。

一方、HPWH 付設住宅向け HEMS モデルの検証では、東大馬場チームが構築した HPWH モデルを汎用ツールである MATLAB/Simulink によりブラックボックス化し、本チームが開発する HEMS モデルに組み込むことで実機特性を活かした HEMS 手法の検証を行った。図 42 は、電気料金ベース DR のひとつである緊急ピーク時課金 (CPP: Critical Peak Pricing) が発動された際に、機器に対する優先度と熱的快適性 PMV を考慮して直接負荷制御することにより、電力消費量を一定値以下に抑える HEMS モデルの検証結果であり、HEMS モデルの有効性を確認するとともに、立ち上がりや電力消費量の変更時の動作遅れなどの実機特性の再現が可能であり、実機特性を反映した HEMS 技術開発が可能であることも確認した。



(a) 機器毎の運用結果



(b) HPWH の運用結果の拡大図

図 41: 実機特性を反映した HEMS による運用結果の一例

④ 系統電圧を考慮した PHV・PV 付設住宅における HEMS 運用の検証

PHV・EV や PV などの新たなエネルギー機器の導入や、需要家の機器利用の多目的化に伴い、家庭における電力収支パターンの多様化が見込まれている。これらは配電系統における電力品質の維持を困難にするほか、配電系統の制約条件が満たされない場合は需要家の目的達成に支障をきたすことが懸念される。そこで、配電系統の電力品質維持における制約条件の達成と需要家

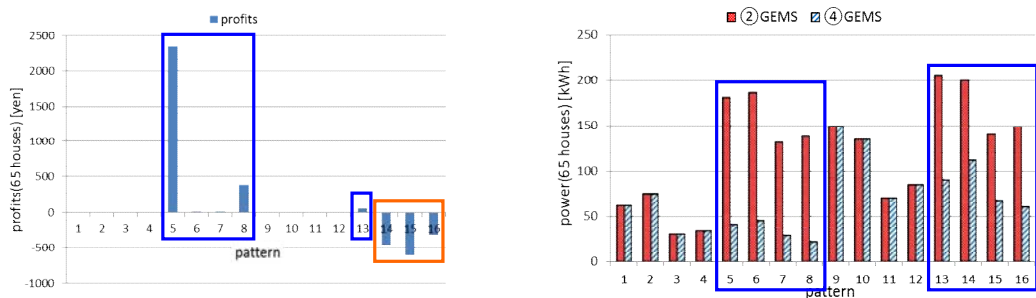
の目的達成の両面を実現するために、配電系統の電圧制御を考慮した EV・PV を含むモデル予測型 HEMS 評価のための共通プラットフォームの検討を行う。

これまでに HEMS と GEMS 間の情報交換の基礎的な枠組みを構築し、シミュレーションによる評価を行った。HEMS・GEMS 間の情報交換は次のような手順で行う。

- I. HEMS が電圧制約を考慮せずに需要家の目的を達成するような EV の充放電計画を決定し、EV 充放電計画及び PV 発電量予測に基づいた宅内電力利用計画を GEMS に提供する。
- II. GEMS が HEMS から受けた宅内電力利用計画に対して最適な電圧制御機器のパラメータを決定する。また、決定したパラメータと宅内電力利用計画を運用した際の最大売電可能量に基づいて、HEMS による EV 充放電計画の再決定時における制約条件となる売電可能上限値を算出し、HEMS に提供する。
- III. HEMS が GEMS から受けた売電可能上限値を制約条件として電圧制約を考慮した EV 充放電計画を決定する。

HEMS・GEMS 間で情報交換を行うことによる有効性を検証するために、家庭内の構成機器や需要家の使用目的が異なる 16 パターンの HEMS 電力収支プロファイルを作成し、EV・PV・HEMS 付設住宅地域を含む配電系統モデルを用いてシミュレーションを行い、電圧制約を考慮した場合（情報交換前）としない場合（情報交換後）における電力コストと PV 出力抑制量の面から比較した。

図 43 は EV・PV・HEMS 付設住宅地域（65 軒）における情報交換前後における総電気代の削減量と PV 出力抑制量を示しており、電気代の削減・微増に対して PV 出力抑制量を大幅に削減できていることが確認できる。



(a) 情報交換前後における総電気代の削減量 (b) 情報交換前後における PV 出力抑制量

図 42: EV・HEMS 付設住宅地域 (65 軒) における比較結果

⑤ 価格調整型 DR に対する需要変化の PV の出力抑制への影響評価

東京大学大橋チームが持つ電力価格などに対する需要家の行動変容に関する知見に基づいて電力価格の変化や気象情報、所持家電機器などの情報に対して経済学的な観点から裏付けが与えられる負荷需要プロファイルを生成し(図 44 参照)、早稲田大学先進グリッド技術研究グループが開発している配電系統モデル Open CREST EMS Model の中で住宅地域を模擬する配電線に導入することで電力価格の設定が電力系統に与える影響をシミュレーションに基づいて評価を行なった。その結果、価格の変化に伴い需要家の負荷利用の仕方も変化し、電圧分布や PV 出力抑制量も変化することが確認でき、今後 DR を含めた様々なケースを想定した場合の協調 EMS の効果を経済指標に基づきシミュレーション評価していくことが可能となることを確認した。

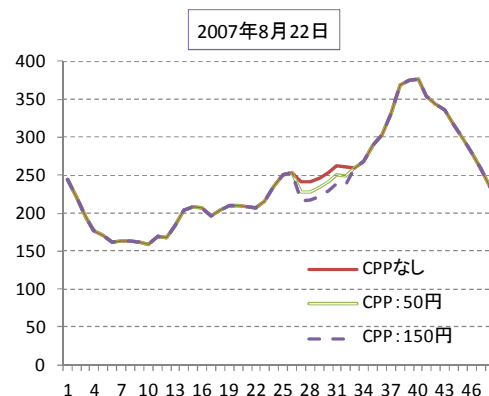


図 43: 生成した負荷プロファイルの例(世帯合計)

⑥ 需要シミュレーションに基づくシナリオベースの系統電圧への影響評価

Open CREST EMS Model におけるシミュレーションでは、これまで過去の実測値を用いた検証を行ってきた。しかしながら、面的に広がる配電系統には住環境の異なる需要家が多数存在するため、多様な負荷プロファイルが混在しており、また、社会の変遷など、時間の経過や様々なシナリオに対応する負荷プロファイルでの検証評価が必要となる。阪大下田チームでは、将来的に考えられる需要家の住環境や居住者の生活行動予測を含むエネルギー需要シミュレーションモデルを開発しており、多様なエネルギー負荷プロファイルの生成が可能である。そこで本FSでは、阪大下田チームが開発したエネルギー需要シミュレーションモデルにより生成された、住環境、保有機器等のシナリオ設定の下での尤もらしい負荷プロファイルを Open CREST EMS Model の代表的な配電線に実装し、配電系統電圧への影響評価を実施した。

負荷プロファイルの生成では、新興戸建住宅地(大阪府摂津市)を想定し、居住する可能性の高い世帯類型を家族類型・住宅類型・住宅熱性能の属性にて設定し、1000軒の負荷プロファイルを生成した。生成した負荷プロファイルは、本チームが開発した電圧制御手法を実装した Open CREST EMS Model の中で住宅地域を模擬する配電線にそれぞれ導入し、本チームが所有する実測データを使用した場合と、配電系統の電圧分布、PV による余剰電力の発生状況や PV 出力抑制量の観点から比較を行った。その結果、配電系統への家庭の配置などにより、電圧分布・PV 出力抑制量が異なることが確認でき、省エネ基準改定などのシナリオをベースとした将来の配電系統モデルでの評価が可能となることも確認した。

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 3 件、国際(欧文)誌 21 件)

1. Akira Yoshida, Yoshiharu Amano, Noboru Murata, Koichi Ito, Takumi Hashizume, “A comparison of optimal operation of a residential fuel cell co-generation system using clustered demand patterns based on Kullback-Leibler divergence”, *Energies*, Vol.6, No.1, pp.374-399, 2013
2. Akira Yoshida, Yoshiharu Amano, and Koichi Ito, “Optimal Operation of a Residential Photovoltaic/fuel-cell Energy System using Scenario-based Stochastic Programming”, *Proc. 26th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS) 2013*, 2013.
3. Khoa Le Dinh, and Yasuhiro Hayashi, “Coordinated BESS control for improving voltage stability of a PV-supplied microgrid”, *Proc. 48th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Ireland, 2013.
4. Genta Kikuchi, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, Yoshikane Kojima, and Shunji Nakao, “Photovoltaic Output Prediction Based on a Collection of Quantile Regression Models”, *Proc. 23rd Photovoltaic Science and Engineering Conference*, 2013.
5. Khoa Le Dinh, and Yasuhiro Hayashi, “Online optimal power flow based on HPSO-TVAC coordinates with centralized BESS and LRT control to stabilize voltage in a PV-supplied microgrid”, *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Europe*, Denmark, 2013.
6. Hiroshi Kikusato, Naoyuki Takahashi, Jun Yoshinaga, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, Shinichi Kusagawa, and Noriyuki Motegi, “Method for Determining Line Drop Compensator Parameters of Low Voltage Regulator using Support Vector Machine”, *Proc. IEEE 5th Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference*, 2014.
7. Naoyuki Takahashi, Hiroshi Kikusato, Jun Yoshinaga, Yasuhiro Hayashi, Shinichi Kusagawa, Noriyuki Motegi, “Dynamic Voltage Control Method and Optimization for LVR in Distribution System with PV Systems”, *Proc. IEEE 5th Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference*, 2014.
8. Shinya Yoshizawa, Yuya Yamamoto, Jun Yoshinaga, Yasuhiro Hayashi, Shunsuke Sasaki, Takaya Shigetou, and Hideo Nomura, “Novel Voltage Control of Multiple Step Voltage Regulators in a Distribution System,” *Proc. IEEE 5th Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference*, Washington, 2014
9. Manato Kameda, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, “Evaluation of CO₂ Reduction and Primary Energy Saving Considering Variability in Demand for Collective Housing with Fuel Cells”, *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol.8, No.2, pp.274-281, 2014
10. Yuya Yamamoto, Shinya Yoshizawa, Jun Yoshinaga, Yasuhiro Hayashi, Shunsuke Sasaki, Takaya Shigetou, Hideo Nomura, “Verification of efficiency of searching methods determining optimal control parameters of advanced SVRs”, *Proc. IEEE International Energy Conference*, Cavtat, 2014
11. Tomoaki Shoji, Wataru Hirohashi, Yu Fujimoto, and Yasuhiro Hayashi, “A Method of Home Energy Management Based on Bayesian Network”, *Proc. 13th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2014
12. Khoa Le Dinh, and Yasuhiro Hayashi, “Experiment with an OPF Controller Based on HPSO-TVAC for a PV-Supplied Microgrid with BESS”, *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2014
13. 亀田真奈人, 藤本悠, 林泰弘, “電力融通を考慮した燃料電池設置型集合住宅における熱電併給運用計画決定手法”, *電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌)*, Vol.134, No.8, pp.682-691, 2014
14. Hayato Homma, Shinya Yoshizawa, Hiroshi Kikusato, Shinji Wakao, Yu Fujimoto, and

- Yasuhiro Hayashi, “PV Output Prediction under Various Conditions of Time and Spatial Resolutions by Just-In-Time Modeling”, Proc. 29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 2014
15. Hiroshi Kikusato, Naoyuki Takahashi, Jun Yoshinaga, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, Shinichi Kusagawa, and Noriyuki Motegi, “Method for Instantly Determining Line Drop Compensator Parameters of Low-Voltage Regulator Using Multiple Classifiers”, Proc. IEEE ISGT PES Innovative Smart Grid Technologies European 2014 Conference, 2014
 16. 吉田 彬, 伊東 弘一, 天野 嘉春, “太陽電池・蓄電池組込み型 PEFC システムの省エネルギー性評価”, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.816, pp.1-11, 2014
 17. Yasunori Isozaki, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto, Hideaki Ishii, Isao Ono, Takashi Onoda, and Yasuhiro Hayashi, “On Detection of Cyber Attacks Against Voltage Control in Distribution Power Grids”, Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2014
 18. Hiroshi Kikusato, Naoyuki Takahashi, Jun Yoshinaga, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, Shinichi Kusagawa, and Noriyuki Motegi “Method for Determining Line Drop Compensator Control Parameters of Low-Voltage Regulator Using Random Forest”, Proc. 3rd International Conference on Power Science and Engineering, Barcelona, 2014
 19. Shunsuke Kawano, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, “Maximum PV Penetration Capacity Evaluation of a Novel Method for Determining LDC Control Parameters of Step Voltage Regulators”, Proc. 3rd International Conference on Power Science and Engineering, Barcelona, 2014
 20. Shunsuke Kawano, Shinya Yoshizawa, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, “The Basic Study for Development of a Method for Determining the LDC Parameters of LRT and SVR Using PV Output Forecasting”, Proc. IEEE 6th Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference, Washington, 2015(発表決定)
 21. Akira Yoshida, Koichi Ito, Yoshiharu Amano, “Energy-saving Evaluation of SOFC Cogeneration Systems with Solar Cell and Battery”, ASME Journal of Fuel Cell Science and Technology, 掲載決定
 22. 山崎朋秀, 本間隼人, 若尾真治, 藤本悠, 林泰弘, “太陽光発電出力予測のための Just-In-Time Modeling を用いた日射量予測信頼区間の推定方法”, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol.135, No.3, 掲載決定
 23. Tomoaki Shoji, Wataru Hirohashi, Yu Fujimoto, Yoshiharu Amano, Shin-ichi Tanabe, and Yasuhiro Hayashi, “Home Energy Management Based on Bayesian Network Considering Priority of Home Appliances”, Journal of International Council on Electrical Engineering, 掲載決定
 24. Yuya Yamamoto, Shinya Yoshizawa, Jun Yoshinaga, Yasuhiro Hayashi, Shunsuke Sasaki, Takaya Shigetou, Hideo Nomura, “Effectiveness of Optimization Updating the Control Parameters of the Advanced SVRs”, Journal of International Council on Electrical Engineering 掲載決定

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 林泰弘, 東日本大震災以降のスマートグリッドのエネルギーマネジメント, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol.133, No.3, pp.225-228, 2012 年 3 月
2. 林泰弘, 「創立 125 周年 特集記事 巻頭言 これからのスマート社会と電気」, 電気学会誌, Vol.133, No.4, pp.297, 2013 年 4 月
3. 林泰弘, 「スマートグリッドの課題と展望」, 日本機械学会誌, Vol.116, No.1133, pp.224-227, 2013 年 4 月
4. 林泰弘, 「日本におけるスマートグリッドの動向」, 情報処理, Vol.54, No.6, pp.612-619, 2013 年 6 月

5. 林泰弘, これからのスマートハウスのエネルギー管理ーデマンドレスポンス技術を用いた次世代 HEMSー, エネルギー・資源, Vol.34, No.4, pp.193-197, 2013 年 7 月
6. 林泰弘, 「我が国におけるスマートグリッドの展望」, 電気設備学会誌, Vol.33, No.8, pp.561-569, 2013 年 8 月
7. 林泰弘, 「小特集 エネルギーマネジメントのためのモデリングとシミュレーションへ GEMSとHEMSの協調モデル へ」, シミュレーション, Vol.32, No.3, pp.162-167, 2013 年 9 月

(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 9 件、国際会議 0 件)

1. 林泰弘, エネルギーマネジメントシステムの未来と夢、科学技術振興機構 (JST)CREST 公開ワークショップ、JST 東京本部別館 1F ホール、2013 年 1 月 28 日
2. 林泰弘, "MEMS とデマンドレスポンス", フジサンケイ ビジネスアイ創刊80周年記念 MEMS 導入セミナー, 大手町サンケイプラザ 4 階ホール, 2013 年 6 月 17 日
3. 林泰弘, "次世代スマートグリッドは建築・都市を変えるか", NSRI フォーラム, NSRI ホール, 2013 年 6 月 19 日
4. 林泰弘, "エネルギーマネジメントで加速するスマートシティの創造とアグリゲーターの役割", 日経環境シンポジウム「MEMS・BEMS導入促進でマンション・オフィスビルの省エネ・節電を考える～アグリゲーターが取り組むエネマネサービスが切り開くスマートシティ～」, イイノホール, 2013 年 6 月 27 日
5. 林泰弘, " ICT 技術とエネルギーマネジメントで実現するスマートシティ創造～CEMS を実現するエネルギーの自動需給応答", 日経スマートシティコンソーシアム第1回日経スマートシティシンポジウム「国家戦略における環境都市創造～都市の活性化、再生、復興、強靱化～」, 日経ホール, 2013 年 7 月 26 日
6. 林泰弘, "スマートシティの創造と国際競争力"～都市の国際競争力とジャパニノベーションで展開する国際標準～, 日経スマートシティシンポジウム, 日経ホール, 2013 年 10 月 28 日
7. 林泰弘, "技術と制度のイノベーションで実現する豊かな低炭素社会", 低炭素社会戦略センターシンポジウム, 伊藤謝恩ホール, 2013 年 11 月 19 日
8. 林泰弘, "分散型電源と電力系統の協調によるエネルギーシステムの構築", コージェネレーション・エネルギー高度利用シンポジウム「エネルギーレジリエンス向上におけるコジェネの役割～次世代エネルギーインフラの構築を目指して～」, 東京国際フォーラム, 2014 年 2 月 12 日
9. 林泰弘, "新宿実証が導くスマート社会への布石", 第4回日経スマートシティシンポジウム「スマートシティ創造で切り開く日本再興～実証から実装へ 新たな価値で行うビジネス、サービスの実現とシティマネジメント～」, 日経ホール, 2014 年 3 月 4 日

② 口頭発表 (国内会議 31 件、国際会議 4 件)

1. 三好龍之介, 宮本裕介, 藤本悠, 林泰弘, EV の大量導入による住宅用 PV 連系配電系統の出力抑制量削減効果の基礎評価、平成 25 年電気学会全国大会、愛知県、2013 年 3 月 21 日
2. 庄司智昭, 広橋亘, 藤本悠, 林泰弘, "デマンドレスポンスに対応した HEMS のリアルタイム制御アルゴリズムの開発", 平成 25 年電気学会全国大会、愛知県、2013 年 3 月 22 日
3. 宮本裕介, 林泰弘, "ヒートポンプ式給湯器を用いた住宅用太陽光発電出力抑制回避制御の最適化", 平成 25 年電気学会全国大会、愛知県、2013 年 3 月 22 日
4. Khoa Le Dinh, and Yasuhiro Hayashi, "Coordinated Battery Energy Storage Systems and LRT Control to Stabilize Voltage in PV-Supplied Micro-grid", 平成 25 年度電気学会電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 27 日

5. 芳澤信哉, 吉永淳, 藤本悠, 林泰弘, ”日中負荷シフトが配電系統の電圧制御機器のタップ制御に与える影響の評価”, 平成 25 年電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 28 日
6. 海野玄陽, 竹中大史, 遠藤彰, 田辺新一, ”細粒度電力測定データを用いた住宅の電力消費分析 その1:世帯特性が電力消費構造に与える影響”, 2013 年度日本建築学会[北海道], 北海道, 2013 年 8 月 30 日-9 月 1 日
7. 竹中大史, 海野玄陽, 遠藤彰, 田辺新一, ”細粒度電力測定データを用いた住宅の電力消費分析 その2:生活パターン推定と測定間隔の違いによる影響”, 2013 年度日本建築学会[北海道], 北海道, 2013 年 8 月 30 日-9 月 1 日
8. 喜久里浩之, 高橋尚之, 吉永淳, 藤本悠, 林泰弘, 草川慎一, 茂木規行, ”LVRにおけるSVMを用いたLDC制御パラメータの決定手法”, 平成25年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 福岡, 2013年9月11日
9. 山本祐也, 芳澤信哉, 吉永淳, 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, ”PV の出力変動に対応した次世代 SVR の最適整定値決定手法”, 平成 25 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 福岡, 2013 年 9 月 13 日
10. 竹中大史, 海野玄陽, 遠藤彰, 田辺新一, ”細粒度の電力測定データを用いて分析した住まい方が電力消費構造に与える影響”, 平成25年度空気調和・衛生工学会大会, 長野, 2013 年 9 月 25 日-9 月 27 日
11. 磯崎保徳, 芳澤信哉, 藤本悠, 石井秀明, 小野功, 小野田崇, 林泰弘, ”配電系統電圧制御におけるサイバー攻撃検知に関する考察”, 第1回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014 年 3 月 5 日
12. 芳澤信哉, 本間隼人, 藤本悠, 若尾真治, 林泰弘, ”PV 予測を活用した Grid EMS の基礎検討”, 平成 26 年電気学会全国大会, 愛媛, 2014 年 3 月 18 日
13. 喜久里浩之, 本間隼人, 高橋尚之, 吉永淳, 藤本悠, 若尾真治, 林泰弘, 草川慎一, 茂木規行, ”PV出力予測を用いたLVRのLDC制御パラメータ導出に関する基礎検討”, 平成26年電気学会全国大会, 愛媛, 2014年3月18日
14. Mohamed Mufaris, Yutaka Ota, Junpei Baba, Shinya Yoshizawa, and Yasuhiro Hayashi, ”Verification of Local Voltage Control Method by Use of Heat Pump Water Heaters with Operation of SVR,” 平成 26 年電気学会全国大会, 愛媛, 2014 年 3 月 18 日
15. 庄司智昭, 佐藤富一, 江部真里奈, 広橋亘, 藤本悠, 林泰弘, 田辺新一, 天野嘉春, ベイジアンネットワークを適用した機器使用傾向学習型 HEMS の開発”, 平成 26 年電気学会全国大会, 愛媛, 2014 年 3 月 20 日
16. Shinya Yoshizawa, Hayato Homma, Yu Fujimoto, Shinji Wakao, and Yasuhiro Hayashi, ”A Novel Grid Energy Management System in Distribution System with PVs”, Proc. International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2014, Korea, 2014 年 6 月 15 日-19 日
17. Yuya Yamamoto, Shinya Yoshizawa, Jun Yoshinaga, Yasuhiro Hayashi, Shunsuke Sasaki, Takaya Shigetou, Hideo Nomura, ”Effectiveness of Optimization Updating the Control Parameters of the Advanced SVRs”, Proc. International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2014, Korea, 2014 年 6 月 15 日-19 日
18. Khoa Le Dinh, and Yasuhiro Hayashi, ”Optimal BESS Placement and Sizing Based on HPSO-TVAC to Stabilize Voltage in PV-Supplied Micro-grid”, Proc. International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2014, Korea, 2014 年 6 月 15 日-19 日
19. Takeshi Takenaka, Genki Unno, Akira Endo, Shin-ichi Tanabe, ”Analysis of influence of lifestyle and season on residential electric power consumption by using a fine-grained power sensing system”, Indoor Air 2014, Hong Kong, 2014 年 7 月 7 日-12 日
20. 江部真里奈, 竹中大史, 海野玄陽, 田辺新一, 庄司智昭, 吉田彬, 林泰弘, ”スマートハウスにおける窓システムとエアコンの協調制御の評価”, 平成26年度空気調和・衛生工学会大会, 秋田, 2014 年 9 月 3 日-9 月 5 日

21. 吉田彬, 藤本悠, 村田昇, 若尾真治, 田辺新一, 天野嘉春, “快適性を考慮した家庭用エネルギーシステムの運用方策の検討”, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京, 2014 年 9 月 9 日
22. 庄司智昭, 松本眞子, 芳澤信哉, 高橋尚之, 藤本悠, 林泰弘, 池上貴志, 岩船由美子, “DR 対応型 HEMS 導入下での LVR による低圧系統電圧制御に関する検討”, 電気学会 平成 26 年電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 10 日
23. 庄司智昭, 松本眞子, 芳澤信哉, 高橋尚之, 藤本悠, 林泰弘, 池上貴志, 岩船由美子, “需給バランスを考慮した HP 給湯機運用の低圧系統電圧への影響評価”, 電気学会 平成 26 年電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 10 日
24. 喜久里浩之, 高橋尚之, 吉永淳, 藤本悠, 林泰弘, 草川慎一, 茂木規行, “Random Forests を用いた LVR の LDC 制御パラメータ決定手法の改良及び実験による検証”, 電気学会 平成 26 年電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 12 日
25. 河野俊介, 芳澤信哉, 藤本悠, 林泰弘, “PV 出力予測を用いた LRT・SVR の LDC 整定値決定手法開発のための基礎検討”, 電気学会 平成 26 年電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 12 日
26. 芳澤信哉, 庄司智昭, 藤本悠, 天野嘉春, 田辺新一, 村田昇, 若尾真治, 林泰弘, “PV 連系配電系統における GEMS の電圧制御と HEMS の宅内負荷機器制御との協調 EMS の基礎検討”, 電気学会 平成 26 年電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 12 日
27. 竹中大史, 江部真里奈, 海野玄陽, 田辺新一, 庄司智昭, 吉田彬, 林泰弘, “熱的快適性・省エネルギー性を考慮した窓システムとエアコンとの協調制御 その1: 制御システムと評価対象建物概要”, 2014年度日本建築学会[近畿], 兵庫, 2014 年 9 月 12 日-9 月 14 日
28. 江部真里奈, 竹中大史, 海野玄陽, 田辺新一, 庄司智昭, 吉田彬, 林泰弘, “熱的快適性・省エネルギー性を考慮した窓システムとエアコンとの協調制御 その2: 協調制御とエアコン単体制御の電力消費量の比較”, 2014年度日本建築学会[近畿], 兵庫, 2014 年 9 月 12 日-9 月 14 日
29. 喜久里浩之, 高橋尚之, 吉永淳, 藤本悠, 林泰弘, 草川慎一, 茂木規行, “判別器を用いた LVR の LDC 制御パラメータの高速決定手法”, 電気学会 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月 24 日
30. 芳澤信哉, 河野俊介, 吉田彬, 藤本悠, 村田昇, 若尾真治, 田辺新一, 天野嘉春, 林泰弘, “予測・運用・制御の一貫した GEMS の電圧制御と HEMS の電熱運用手法との協調 EMS 手法の評価”, 電気学会 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月 24 日
31. 山本祐也, 芳澤信哉, 林 泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, “次世代 SVR のパラメータ更新による配電系統の電圧制御の最適化の基礎検討”, 電気学会 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月 24 日
32. 松本直也, 庄司智昭, 藤本悠, 天野嘉春, 田辺新一, 林泰弘, “エアコン・窓システムを対象とした学習型空調自動制御の提案”, 電気学会 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月 24 日
33. 高橋尚之, 三好龍之介, 吉永 淳, 林泰弘, “高低圧一貫型配電系統を用いた LVR 設置位置に関する検討”, 電気学会 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月 24 日
34. 山崎朋秀, 本間隼人, 若尾真治, 藤本悠, 林泰弘, “太陽光発電出力予測のための Just-In-Time Modeling を用いた日射量予測信頼区間の推定方法”, 電気学会 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 大阪, 2014 年 9 月 25 日
35. 小方亮平, 吉田彬, 藤本悠, 村田昇, 若尾真治, 田辺新一, 天野嘉春, “予測・運用計画・制御手法に基づく家庭用エネルギーシステムの時間帯別料金を考慮した経済性評価”, エネルギー・資源学会 第 31 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス

ス, 東京, 2015 年 1 月 27-28 日(発表決定)

③ ポスター発表 (国内会議 10 件、国際会議 8 件)

1. Takahiro Terazono, Shinji Wakao, Haoyang Shen, Hideitsu Hino and Noboru Murata, Confidence Estimation of Solar Radiation Forecast with Just-In-Time Modeling, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, November 24th, 2012
2. 庄司智昭, 広橋亘, 藤本悠, 林泰弘, エネルギー機器の電力消費パターンに対する HEMS の Auto DR 制御の季節別評価, 平成 25 年度電気学会電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 27 日
3. 喜久里浩之, 高橋尚之, 吉永淳, 林泰弘, 草川慎一, 茂木規行, "PV連系配電系統におけるLDC制御パラメータの動的決定手法", 平成25年電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013年8月27日
4. 三好龍之介, 吉永淳, 林泰弘, "地区区分を考慮した配電系統モデルにおける柱上変圧器細分化と配電線太線化による PV 導入限界拡大の評価", 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 27 日
5. 山本祐也, 芳澤信哉, 吉永淳, 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生, "次世代 SVR の多段設置を想定した PV 連系系統の最適整定値決定手法", 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 新潟, 2013 年 8 月 27 日
6. 吉田彬, 村田昇, 天野嘉春, "典型的需要パターンが及ぼすエネルギー供給システムへの影響分析手法の検討", 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013 (SSI2013), 滋賀, 2013 年 11 月 19 日
7. 藤本悠, 喜久里浩之, 高橋尚之, 吉永淳, 林泰弘, 草川慎一, 茂木規之, "判別器を用いた LVR における LDC 制御パラメータの高速導出手法", 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013 (SSI2013), 滋賀, 2013 年 11 月 19 日
8. 芳澤信哉, 吉永淳, 藤本悠, 林泰弘, "GEMS と HEMS の統一モデルにおける協調制御の基礎検討", 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013 (SSI2013), 滋賀, 2013 年 11 月 19 日
9. Yu Fujimoto, Shinya Yoshizawa, and Yasuhiro Hayashi, "Development of Technology for Collaborative Energy Management System and Foundation for Versatile Demonstrative Research and Its Evaluation", 2014 Joint JST-NSF-DFG Workshop Distributed Energy Management Systems, Honolulu, Hawaii USA, January 12th, 2014
10. Tomoaki Shoji, Wataru Hirohashi, Yu Fujimoto, Yoshiharu Amano, Shin-ichi Tanabe, and Yasuhiro Hayashi, "Home Energy Management Based on Bayesian Network Considering Priority of Home Appliances", Proc. International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2014, Jeju, Korea, June 15th - 19th, 2014
11. Yu Fujimoto, Taiki Sugiura, and Noboru Murata, "K-Nearest Neighbor Approach for Forecasting Energy Demands Based on Metric Learning", 2014 International Work-Conference on Time Series, Granada, Spain, June 25th, 2014
12. 森皓平, 喜久里浩之, 芳澤信哉, 藤本悠, 林泰弘, 川島明彦, 稲垣信吉, 鈴木達也, "配電系統電圧制御を考慮したモデル予測型 HEMS による PHV 充放電計画の評価", 電気学会 平成 26 年電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 10 日
13. 庄司智昭, 松本真子, 芳澤信哉, 高橋尚之, 藤本 悠, 林 泰弘, 池上貴志, 岩船由美子 "DR 対応型 HEMS 導入下での LVR による低圧系統電圧制御に関する検討", 電気学会 平成 26 年電力・エネルギー部門大会, 京都, 2014 年 9 月 10 日
14. Shunsuke Kawano, Yu Fujimoto, Shinji Wakao, Yasuhiro Hayashi, Hideaki Takenaka, Hitoshi Irie, and Takashi Y. Nakajima, "A Basic Study of Distribution Automation for Service Restoration in a Distribution System with Distributed Generators", the 6th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy

Resources, Kyoto, Japan, November 17–20th, 2014

15. Shinya Yoshizawa, Yuya Yamamoto, Yasuhiro Hayashi, Shunsuke Sasaki, Takaya Shigeto, and Hideo Nomura, “Advanced Voltage Control Method of Multiple Step Voltage Regulators in Distribution Feeder”, the 6th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources, Kyoto, Japan, November 17–20th, 2014
16. 森皓平, 喜久里浩之, 芳澤信哉, 藤本悠, 林泰弘, 川島明彦, 稲垣伸吉, 鈴木達也, “HEMS による電圧制約を考慮した EV 充放電計画の決定と貢献の評価”, 計測自動制御学会システム・情報部門 学術講演会 2014 (SSI2014), 岡山, 2014 年 11 月 21–23 日
17. Tomohide Yamazaki, Y. Hara, Shinji Wakao, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, K. Nukada, T. Tamura, and M. Takahata, “Application of PV Output Prediction Interval to Battery Operation of Green Base Transceiver Station”, 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Kyoto, Japan, November 26th, 2014
18. Hayato Homma, Tomohide Yamazaki, Shinya Yoshizawa, Hiroshi Kikusato, Shinji Wakao, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, “Fluctuation Range Prediction of PV Output by Using Just-In-Time Modeling”, 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Kyoto, Japan, November 26th, 2014

(4)知財出願

①国内出願
無し

②海外出願
無し

③その他の知的財産権
無し

(5)受賞・報道等

①受賞 (顕著な受賞の前に*を付記してください)

1. 庄司智昭, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会 YPC 優秀発表賞, 2013 年 8 月
2. 喜久里浩之, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会 YPC 優秀発表賞, 2013 年 8 月
3. 山本裕也, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会 YPC 優秀発表賞, 2013 年 8 月
4. 本間隼人, “気象庁メソ数値予報データを用いた各種日射量予測手法の制度比較検討”, 平成 25 年度日本太陽エネルギー学会奨励賞(学生部門), 2014 年 5 月
5. Tomoaki Shoji, Wataru Hirohashi, Yu Fujimoto, Yoshiharu Amano, Shin-ichi Tanabe, and Yasuhiro Hayashi, “Home Energy Management Based on Bayesian Network Considering Priority of Home Appliances”, Best Paper of ICEE 2014, 2014 年 7 月
6. Shinya Yoshizawa, Hayato Homma, Yu Fujimoto, Shinji Wakao, and Yasuhiro Hayashi, “A Novel Grid Energy Management System in Distribution System with PVs”, Best Paper of ICEE 2014, 2014 年 7 月
7. Yuya Yamamoto, Shinya Yoshizawa, Jun Yoshinaga, Yasuhiro Hayashi, Shunsuke Sasaki, Takaya Shigeto, Hideo Nomura, “Effectiveness of Optimization Updating the Control Parameters of the Advanced SVRs”, Best Paper of ICEE 2014, 2014 年 7 月

8. 喜久里浩之, “LVR における LDC 制御パラメータのクラスタリングによる決定手法”, 平成 25 年電気学会優秀論文発表賞, 2014 年 9 月

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. “HEMS は悪魔の箱じゃない, 新たな価値を生む基盤に”, 日経エレクトロニクス, 2013 年 03-04 号
2. “MEMS とデマンドレスポンス”, Fuji Sankei Business 1, 2013 年 7 月 18 日
3. “ICT とエネルギーマネジメントで実現するスマートシティ創造”, 日経新聞, 2013 年 8 月 28 日
4. “スマートシティの創造と国際競争力”, 日経新聞, 2013 年 8 月 28 日
5. “新しい都市, 地域のあり方を考える”, 日経新聞, 2014 年 1 月 29 日
6. “小部屋で大規模実証 早大と経産省連携”, 日刊工業新聞, 2014 年 6 月 11 日
7. “スマート技術機構が発足 5 分野の知見を結集”, 電気新聞, 2014 年 7 月 7 日
8. “スマート社会実現へ 早大 技術融合で機構設立”, 建設通信新聞, 2014 年 7 月 7 日
9. “早大 スマート技術研究拠点設置”, 日刊建設工業新聞, 2014 年 7 月 7 日
10. “産学官連携し研究開始”, 日刊建設工業新聞, 2014 年 7 月 7 日
11. “スマート社会実現へ 早大研究機構が発足式”, 日刊建設工業新聞, 2014 年 7 月 8 日
12. “民間参画を呼び掛け スマート研究機構発足式 早稲田大”, 日刊建設工業新聞, 2014 年 7 月 8 日
13. “機動的な電力網構築の段階に”, 日経新聞, 2014 年 7 月 25 日
14. “Japan begins testing *smart house* technology”, Asia Research News 2014, 2014/08 号

③その他

無し

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- ・ 本研究で開発した協調 EMS 評価のための汎用的な計算機シミュレーションプラットフォーム「Open CREST EMS Model」について、本プロジェクトにおける FS 活動を通して外部に提供を開始している。

②社会還元的な展開活動

- ・ CREST での研究成果を大きな研究基盤の1つとして先進グリッド技術研究所を中心とした「スマート社会技術融合研究機構」を早稲田大学内に設立し、インフラ系企業17社、および経産省と国交省がオブザーバ参加している「スマート社会技術推進協議会」、メーカー14社が参加する「スマート社会技術研究会」との大きな産官学連携の枠組みを構築している。

§ 5 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
2012 年 10 月 26 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	16 人	研究進捗報告のためのミーティング
2012 年 12 月 6 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	17 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 1 月 17 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	15 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 3 月 1 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	16 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 5 月 15 日	FS に向けた打合せ(非公開)	早稲田大学	20 人	FS に向けたミーティング
2013 年 5 月 16 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	15 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 6 月 7 日	実証設備公開	早稲田大学	13 人	設備公開と研究成果意見交換
2013 年 7 月 10 日	FS ミーティング(非公開)	早稲田大学	17 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 7 月 10 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	18 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 9 月 5 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	19 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 10 月 17 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	21 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 10 月 23 日	FS ミーティング(非公開)	早稲田大学	18 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 11 月 8 日	実証設備公開	早稲田大学	21 人	設備公開と研究成果意見交換
2013 年 11 月 14 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	13 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 11 月 18 日	研究成果意見交換会	早稲田大学	10 人	研究成果意見交換
2013 年 12 月 19 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	13 人	研究進捗報告のためのミーティング
2014 年 1 月 16 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	17 人	研究進捗報告のためのミーティング
2014 年 2 月 5 日	FS ミーティング(非公開)	早稲田大学	16 人	研究進捗報告のためのミーティング
2013 年 2 月 13 日	チーム内ミーティング(非公開)	早稲田大学	16 人	研究進捗報告のためのミーティング

2013 年 3 月 12 日	実証設備公開	早稲田大学	9 人	設備公開と研究成果意見交換
2013 年 3 月 13 日	チーム内ミーティング (非公開)	早稲田大学	14 人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014 年 6 月 13 日	FS2キックオフ会議(非 公開)	早稲田大学	17 人	FS 第2フェーズ開始に向け たミーティング
2014 年 7 月 3 日	チーム内ミーティング (非公開)	早稲田大学	17 人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014 年 7 月 14 日	FS2 ミーティング(非公 開)	早稲田大学	16 人	研究進捗報告、最強チーム 編成に向けたミーティング
2014 年 8 月 8 日	チーム内ミーティング (非公開)	早稲田大学	15 人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014 年 9 月 9 日	FS2 ミーティング(非公 開)	早稲田大学	17 人	研究進捗報告、最強チーム 編成に向けたミーティング
2014 年 9 月 18 日	チーム内ミーティング (非公開)	早稲田大学	12 人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014 年 9 月 25 日	FS2 最終会議(非公開)	早稲田大学	17 人	FS 第2フェーズ成果、最強 チーム研究方針の報告
2014 年 10 月 16 日	チーム内ミーティング (非公開)	早稲田大学	16 人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014 年 11 月 10 日	チーム内ミーティング (非公開)	早稲田大学	16 人	研究進捗報告のためのミー ティング

§ 6 最後に

本研究プロジェクトは2年半に渡り、電力工学、情報工学、機械工学、建築環境学などの分野横断的な活動を通じて分散協調型 EMS の実現に向けて様々な取り組みを実施してきた。研究推進にあたっては2ヶ月に1度程度の頻度で継続してきたチーム内のミーティング(図 45 参照)をコアとし、分野間の密な議論を重ねながら研究の実施を行ってきた。

本チームの研究実施の特色としては予測・運用・制御一貫型分散協調 EMS の枠組みの開発という技術基盤の構築と並行して、電力工学、機械工学、建築環境学の観点から多様な研究実施内容のハードウェア的な特性も考慮した実験設備を構築・利用し、研究内容の検証を重ねてきたという点が挙げられる。例えば図 46 に示す電力・給湯負荷を可制御とした燃料電池 CGS 実験装置を構築することで機器毎のエネルギー入出力特性のモデル化が可能となり、ここで同定された入出力特性に基づき、家庭用エネルギーシステム全体を機能毎に幾つかのサブシステムに分割し、エネルギー収支および機器特性を制約とする最適運用計画問題を構築した。また、図 47 に示す早稲田大学保有の実大住宅 NobiNobi-HOUSE において計測した室温などの実測結果と計算機上に構築した室内熱負荷計算モデルに基づいて算出したシミュレーション結果の比較を実施することで、様々な条件下における空調機器等の協調制御による電力消費量削減効果の把握・検証を行った。



図 44: チーム内ミーティングの様子



図 45: CGS実験装置

建物場所	静岡県富士市
建物位置	北緯35°14' 東経138°68'
建物面積	53.58m ²
建物高さ	2.7m
窓面積	21.96m ²
壁・天井・床	ALC/パネル100mm+ 発泡フェノールフォーム 100mm (外断熱)
窓	遮熱Low-eペアガラス18mm

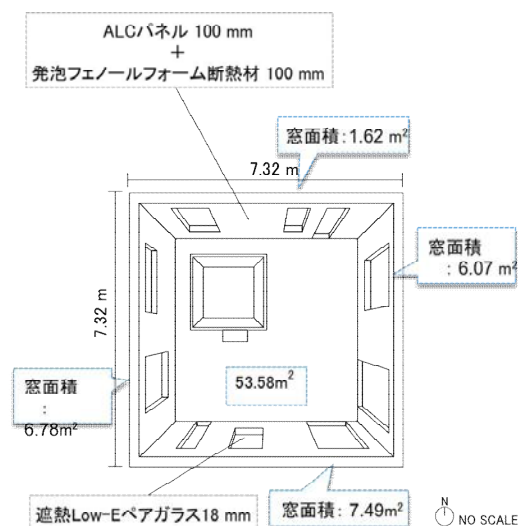


図 46: 早大 ZEH 実大住宅 NobiNobi-HOUSE 実測結果を用いたシミュレーションモデル精度検証

さらに、協調 EMS 実現手法の妥当性・有効性をハードウェアレベルで検証するため、図 48 に示すような汎用的な EMS 模擬シミュレータの構築を行った。この EMS 模擬シミュレータは、配電用変圧器から引き出された 6.6kV の三相 3 線式高圧配電線 1 回線を、400V の三相 3 線式(非接

地)でスケールダウンして模擬しており、自動電圧調整器(AVR)、高低圧配電線路模擬装置、高圧電圧制御機器(SVR)、次世代低圧電圧制御機器(LVR)、負荷・PV等模擬装置(三相・単相インバータ)、通信制御装置(dSPACE)によって構成され、各配電系統模擬装置を電氣的に自由に接続することにより、多様な配電系統構成を模擬することができる。本プロジェクトにおいて構築、拡充された本模擬シミュレータは、計算機上で構築した統合協調EMSシミュレーション環境と併用する形で、様々な理論・数理モデルの有効性や妥当性について多面的な定量評価を与えるために今後さらに利活用され、次年度以降の最強チームでの研究において経済分析、サイバーセキュリティなどのより幅広い観点を考慮した実用的な分散協調EMSの開発のための重要なツールとなることが引き続き期待できる。

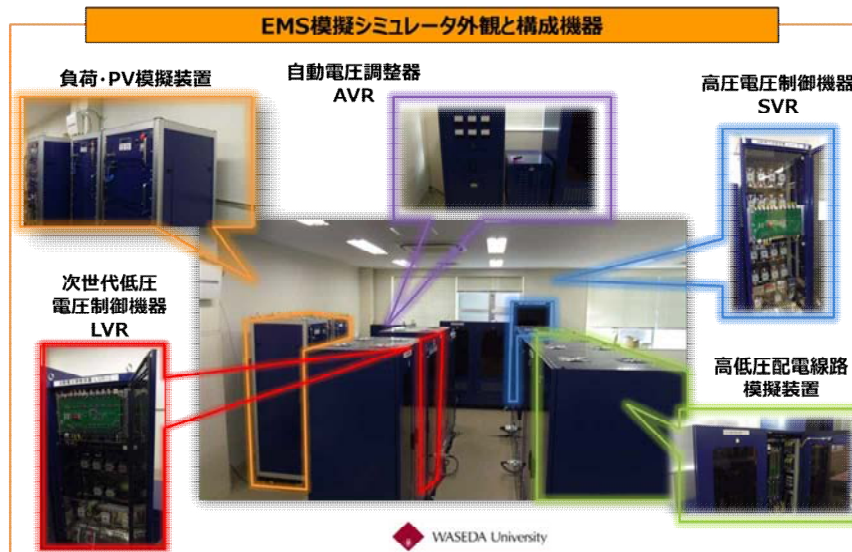


図 47:EMS 模擬シミュレータの外観