熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討（その３）

Quantitative Evaluation on Electric Load Profile Control by CHP-based Demand Response

杉本一郎*・安芸裕久**・毛笠明志***
Ichiro Sugimoto　Hirohisa Aki　Akeshi Kegasa

Japan is going to open the retail power market in April 2016 and the retail city gas market in April 2017, and the negawatt power market follows by 2017. In Japan, residential fuel cells (FCs) as micro-CHPs have been released since 2009 and installed over 140,000 sets until September 2015. Demand Response (DR) using residential FCs is expected to play a new role in the negawatt power market. Previously, we proposed a concept of CHP-based DR mechanism for controlling the electric load profile and the heat load profile of an apartment house which is equipped with a residential FC in each dwelling.

In this paper, the electricity and hot water demands of the apartment house on hot summer days and cold winter days are constructed by the bottom-up approach using time-use data, and these demands are classified according to life styles and bathing styles. FC working simulation on daily start and stop operation is performed in each energy demand class. The simulation results evaluate the effects of electric load control by CHP-based DR quantitatively.

Keywords : demand response, electrical load profile, combined heat and power

１．まえがき

東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第１原子力発電所の事故を契機に,日本の電力需給は逼迫した状況にあり,政府ではそれを打開するための政策の一つとして，電力および都市ガスのシステム改革が進められている．まず 2016 年４月に電力小売事業が，2017 年４月には都市ガス小売事業が全面自由化される[1)]．また需要家サイドによる新たなエネルギー需給施策として，ネガワット取引のためのガイドラインが策定され[2)]，2017 年までに「ネガワット取引市場」の創設が予定されている[3)]。

一方日本では，家庭の電力・熱需要を自家で賄う超小型コージェネレーション設備（以下，CHP と略す）として，戸建住宅向けの定置用燃料電池（以下，FC と略す）が 2009 年６月に商品化され，また集合住宅向け FC が 2014 年４月に発売され[4)]，2015 年９月末までの約６年間で合計 14 万台以上が設置・導入されている[5)]．

本研究では,１棟100戸以下の規模の集合住宅を対象に,各戸に集合住宅向け FC が装備され，棟屋全体で系統電力と都市ガスが一括連系・供給する「集合住宅モデル」を設定し，電力および都市ガスの小売事業者・アグリゲータ等からの電力・都市ガス量の抑制要請に対応して，一括受電点・供給点からみた棟屋全体の電力負荷プロファイルおよび熱負荷量を,FC の発電予備力を利用して制御する機構と,CHP が有する稼動制約を取り除き FC の稼動を促進する行動を合わせた,「熱・電気を統合したデマンドレスポンス（以下，DR と略す)」について検討を行っている．

これまで第１報では,集合住宅モデルを設定すると共に,集合住宅全体で電力 DR の要請に対応する仕組みとして,「電力負荷プロファイルの制御機構」と「熱消費シフト行動」を提案した[6)]．また第２報では,「ネガワット・ガス取引」を想定して，同様の集合住宅モデルにおいて都市ガス量の抑制要請に対応する仕組みとして,「熱負荷量の制御機構」と「電力消費シフト行動」を提示した[7)]．

本稿では，集合住宅モデルの冬期と夏期における電力・温水需要プロファイルを作成し，第１報で提案した電力負荷プロファイルの制御機構（以下，DR-E と略す）による,集合住宅モデルの一括受電量の可制御域(電力 DR による抑制量）について報告する．まず，集合住宅モデル（住宅数

*株式会社エネルギー・生活科学研究所
〒537-0024　大阪市東成区東小橋２丁目 10 番 26 号
E-mail　ichiro@energy-and-humanlife.com
**独立行政法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門
　エネルギーシステム戦略グループ
〒305-8568　茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第二事業所
***大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 燃焼工学領域
〒565-0871　大阪府吹田市山田丘 2-1 産学連携本部 D 棟

100 戸）の住戸部の電力・温水需要を，生活時間調査による在宅率と入浴スタイル（浴槽・シャワー・入浴時間）から類型化し，家電機器の消費電力仕様からボトムアップ的に作成する．共用部の電力需要も共用設備の消費電力仕様からボトムアップ手法で作成する．次に，集合住宅向けFCの発電出力，排熱出力，部分負荷特性等の諸元を設定し，通常モード（自動発電モード）の学習・予測制御アルゴリズムを策定して，類型化した電力・温水需要ごとに1日分のFC稼動シミュレーションを行う．各シミュレーション結果に共用部の電力需要を加えて，通常モードにおける集合住宅モデルの一括受電点での電力負荷プロファイルを算定すると共に，DR-Eを施行した場合のDR要請時間帯における一括受電量の抑制効果を推定する．

２．集合住宅モデルの電力・温水需要プロファイル

集合住宅モデルは，1棟100戸以下の規模で，各戸に住宅設備としてFCが設置され，棟屋全体で系統電力と都市ガスが一括連系・供給し，各戸のFCと電力・ガスのスマートメータはインターネットと接続されているものとする[6)]．

電力需給が逼迫する冬期（極寒期）と夏期（猛暑期）を電力DRの対象時期として，当該時期の集合住宅モデルの住宅部100戸の電力需要と温水需要プロファイルおよび共用部の電力需要プロファイルを，以下の手順で作成する．

2.1 生活行動から在宅活動人数の時間推移の設定

生活行動から家庭のエネルギー需要を推定する研究は多数あるが[8-10)]，本研究で対象とする集合住宅モデルの電力・温水需要は住宅部100戸合計（または1戸平均）であり，かつ対象時期が極寒期・酷暑期で空調電力の比率が大きいため，その他の家電機器の使用時間・頻度の厳密な特定は不要となる．つまり，集合住宅モデルの電力需要は，居住者の在宅の人数・時間帯，宅内での活動人数・活動時間帯等の生活行動に依存すると考えられる．

まず，NHK放送文化研究所の「2010年 国民生活時間調査」の在宅率[11)]と，総務省国勢調査の「2010年 世帯人員」の平均世帯人員2.5人（2.42人）[12)]から，平日の在宅人数の時間推移を算定する（**図1-1**参照）．次に，住宅部100戸の内50戸の居住者は午前中に外出する（AM外出型；**図1-2**参照），他の50戸の居住者は午後に外出する（PM外出型）と設定して，外出時間帯を2つに分類する．さらに，これらの在宅人数の時間推移に睡眠行為者率[11)]を畳み込み，1日の「在宅活動人数」の時間推移を導出する（**図1-3**参照）．

2.2 住宅部の電力・温水需要プロファイルの作成

集合住宅モデルの住宅部の電力需要は，住宅内の行動分類[11)]と家電機器を関連付けて，外出時間帯の分類（AM・PM外出型）ごとに在宅活動人数の時間推移上で各行動に時間幅を持たせ，家電機器の消費電力をボトムアップ的に積み上げて構成する．ここで想定する家電機器は，2014年4月時点でのトップランナー基準に適合する新製品を採用し，その電力需要形態は以下の5つに分類される．

- ベース電力需要（冷蔵庫，温水洗浄便座等）
- 在宅人数に依存するベース電力需要（暖房・冷房）
- 特定の生活行動に起因した電力需要（空調予約）
- 宅内の生活行動時間に比例した電力需要（照明・TV）
- 宅内の生活行動の工程一式の電力需要（洗濯機等）

図2-1に冬期・平日の住宅1戸平均の電力需要の構成(AM外出型)を示す．

また集合住宅モデルの住宅部の温水需要は，建築環境・省エネルギー機構が提案する「修正M1モードの平日(小)」[13)]（1世帯4人を想定）を基に，1世帯2.5人向けに修正する．さらに温水需要は入浴スタイルから以下のように6つに分類し，入浴による温水需要の時刻分布を変更する

（冬期） 浴槽使用(夜)，シャワー(夜)

（夏期） 浴槽使用(夜)，シャワー(夜)，シャワー(朝)，
シャワー(朝・夜分散)

図2-2に冬期・平日の住宅1戸平均の電力・温水需要プロファイル(AM外出型・浴槽使用)を示す．

2.3 共用部の電力需要プロファイルの作成

近年の共用設備（消防・換気・セキュリティ，照明，給水ポンプ，エレベータ，空調）の消費電力・待機電力は極めて省エネ化が進んでいることを勘案して，集合住宅モデルの共用部の電力需要は，2014年4月時点での最新設備の消費電力をボトムアップ的に積み上げて構成する．ここで，各設備の使用頻度，稼動時間帯等は先行研究[14)]等を参照して設定した．**図3**に冬期・平日の住宅部100戸と共用部の電力需要プロファイルを示す．

３．FC稼動シミュレーション

集合住宅モデルの各住宅に設置されるFCの諸元は，2015年4月時点の製品仕様[15)]と先行研究[16)]を参考に，以下のように設定する．

（FCの諸元）

- ・発電出力　0.70 kW（0.20 - 0.70 kW）
  発電効率　35.2 %（HHV）（**図4**部分負荷特性参照）
- ・排熱出力　1.01 kW（0.21 - 1.01 kW）
  排熱回収効率　50.6 %（HHV）（**図4**部分負荷特性参照）
- ・ガス消費量 2.0 kW（0.70 kW発電時）
- ・燃料電池形式　固体高分子形
- ・貯湯槽　140 L（貯湯温度60℃）
- ・補助熱源　潜熱回収型ガス瞬間式

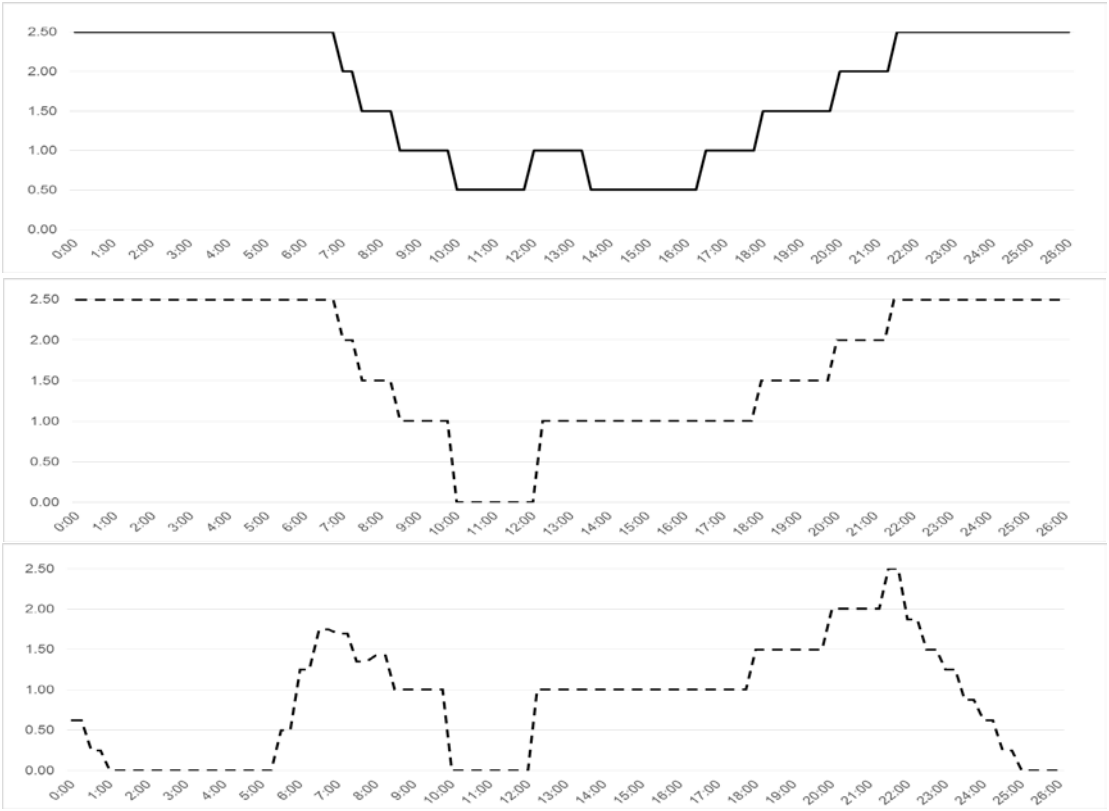

図 1-1（上）1 日の「在宅人数」の時間推移（平日・1 世帯 2.5 人）（実線）

図 1-2（中）1 日の「在宅人数」の時間推移（平日・AM 外出型）（破線）

図 1-3（下）1 日の「在宅活動人数」の時間推移（平日・AM 外出型）（破線）

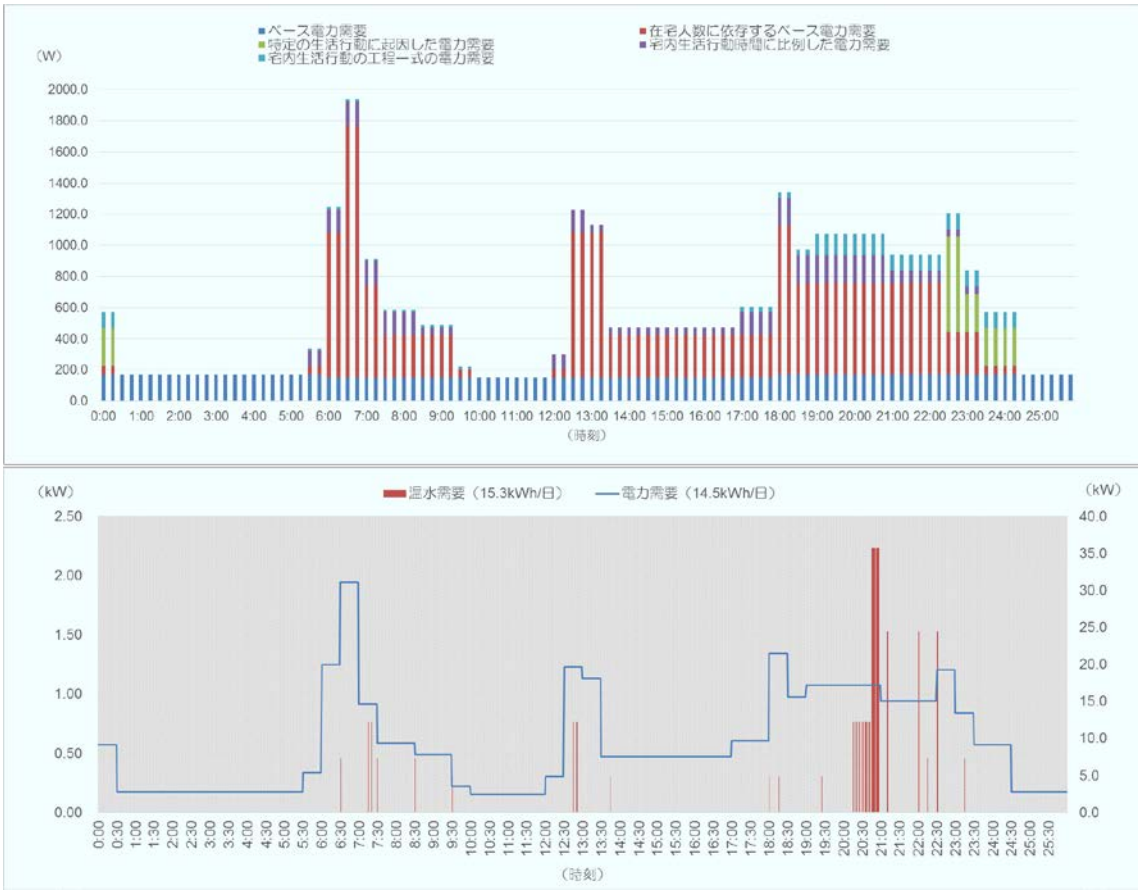

図 2-1（上）住宅 1 戸平均の電力需要の構成〔厳寒期〕（平日・AM 外出型）

図 2-2（下）住宅 1 戸平均の電力・温水需要プロファイル〔極寒機〕（平日・AM 外出型・浴槽使用）

図 3 住宅部 100 戸と共用部の電力需要プロファイル〔極寒機〕（平日）

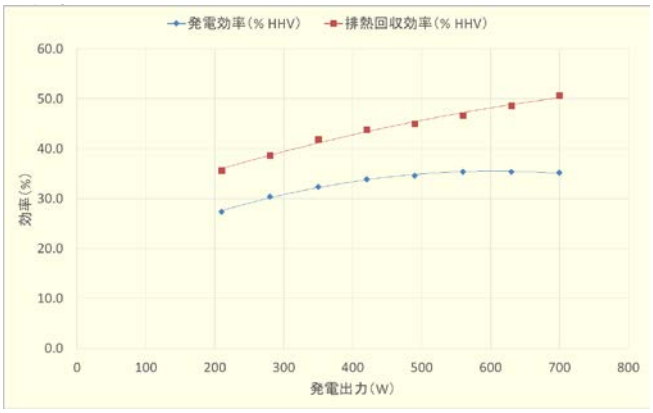

図 4 FC 発電出力・排熱出力の部分負荷特性

各住宅の FC は通常モード（自動発電モード）では，自家の 1 日の電力・温水需要パターンを学習し，その蓄積データから翌日の温水需要パターンを予測し「Daily Start and Stop（DSS）運転」を基調として稼動計画を立案する．FC の稼動は，深夜のある時点（例えば AM2 時）を起点として，計画に則して冷機運転を開始し，自家の電力需要が FC の発電下限値以上であれば発電を行い，以下であれば暖機運転に移り，所定の温水量を生成した時点で運転を終了する．また不足分の温水量は補助熱源により充当する．

本研究での通常モードの FC 稼動シミュレーションは，以下の前提・制約条件の下で実施する．

（前提）

・FC は 1 日 1 回の DSS 運転を行う

・電力・温水需要プロファイルは正確に予測されている

・FC の発電出力は自家電力需要値以下とする

・所定の温水量は「一定時間内の最大温水需要」とし，使用直前までに生成する

・貯湯槽の放熱損失は考慮しない

（制約条件）

・冷機運転は 1 時間とし，FC は発電下限値と同様の都市ガス量を消費し温水のみを生成する

・FC が運転開始後，電力需要が発電下限値以下の場合は暖機運転に移り，温水のみを生成する

・貯湯槽が満水になった場合には，FC は運転を終了する

図 5-1 に冬期･平日の住宅 1 戸平均の電力需要と FC 発電出力結果(AM 外出型)を，**図 5-2** に温水需要と FC 貯湯熱量の推移(浴槽使用)を示す．

４．電力負荷プロファイルの制御機構の効果予測

集合住宅モデルの住宅部 100 戸の FC 発電出力は，AM 外出型 50 戸と PM 外出型 50 戸の FC 発電出力（計 100 台）を合計して算定される．**図 6-1** に冬期・平日の住宅部 100 戸の電力需要プロファイルと FC 発電出力（100 台）を示す．

また，集合住宅モデルの一括受電点での電力負荷プロファイルは，住宅部 100 戸の電力需要から FC 発電出力（計 100 台）を控除し，共用部の電力需要を加算したものとなる．**図 6-2** に冬期・平日の住宅部 100 戸の受電量合計と集合住宅モデル全体の一括受電量を示す．

各 FC の予備力（定格発電容量と実効発電出力の差）は，FC 稼動シミュレーションから算定される．よって，各 FC の発電出力を増加させて棟内逆潮流を行い，共用部の電力需要を賄うことにより，時間帯を限定して集合住宅モデルの一括受電量を FC の予備力の範囲で抑制することが可能となる．**図 7** に集合住宅モデルの一括受電量と FC 予備力合計および DR-E による一括受電量の抑制効果(推定)を示す．

５．まとめ

本稿では，熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討の第 3 報として，電力 DR 要請に沿った電力負荷プロファイル制御機構（DR-E）による，集合住宅モデルの一括受電量の抑制効果を定量化した．その結果，夏期（酷暑期）の DR 要請時間帯では，熱消費シフト行動を伴う DR-E により一括受電量を抑制することが可能となるが，冬期（厳寒期）の場合は，DR 要請時間帯のベースライン（通常モードでの FC 稼動状況）によって，一括受電量を充分に抑制できない時間帯があることが判明した．

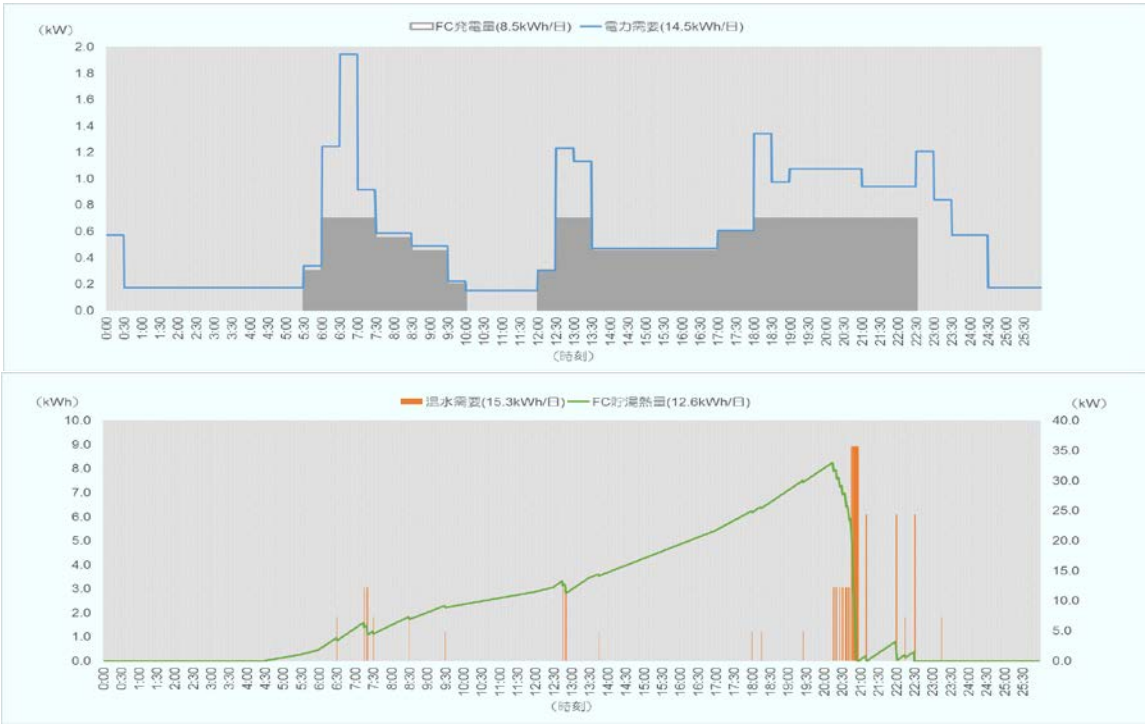

図 5-1（上）住宅 1 戸平均の電力需要と FC 発電出力〔厳寒期〕（平日・AM 外出型・浴槽(夜)）

図 5-2（下）住宅 1 戸平均の温水需要と FC 貯湯熱量の推移〔厳寒期〕（同上）

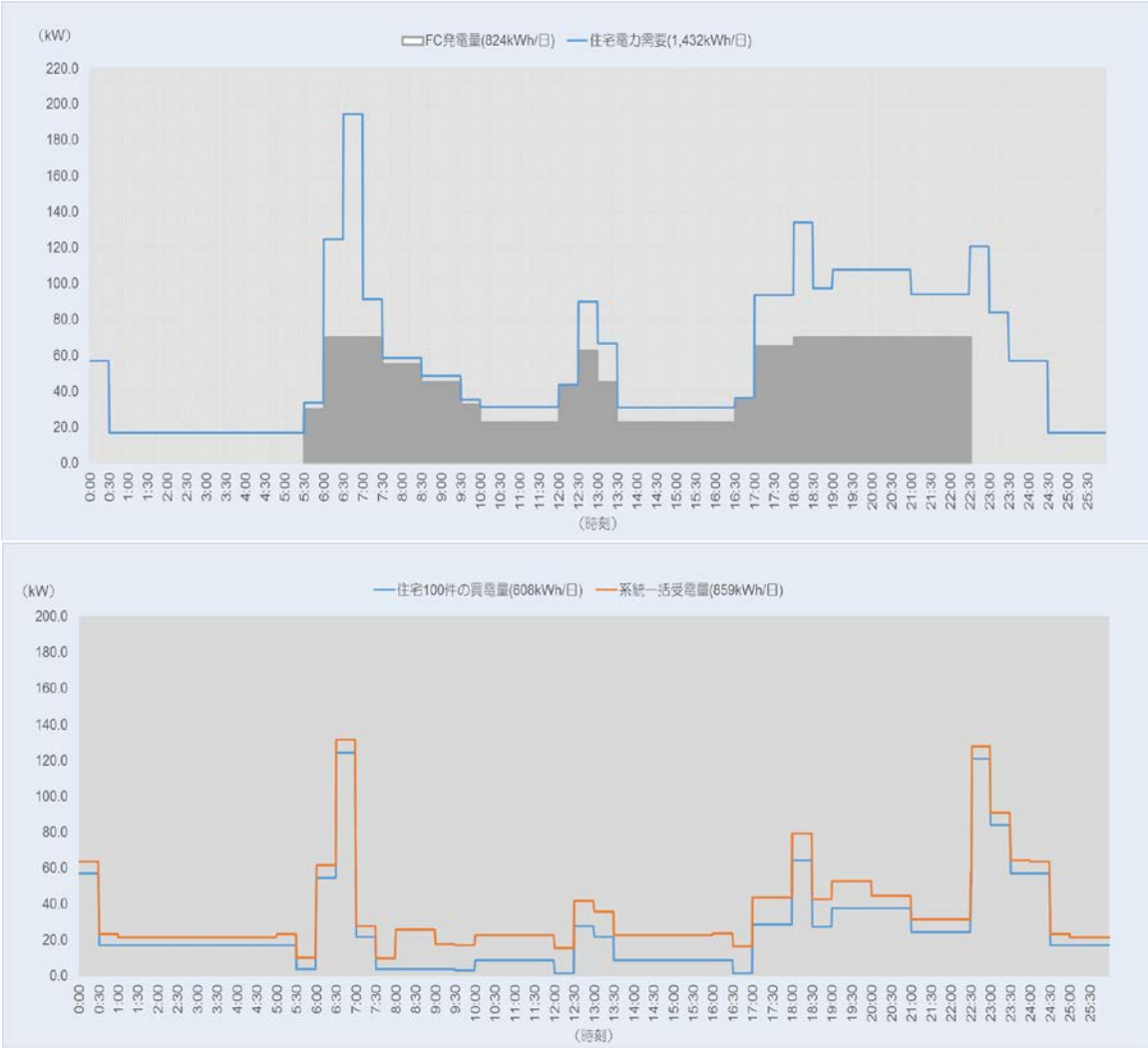

図 6-1（上）住宅部 100 戸の電力需要プロファイルと FC 発電出力（100 台）〔厳寒期〕（平日）

図 6-2（下）住宅部 100 戸の受電量合計と集合住宅モデル全体の一括受電量〔厳寒期〕（平日）

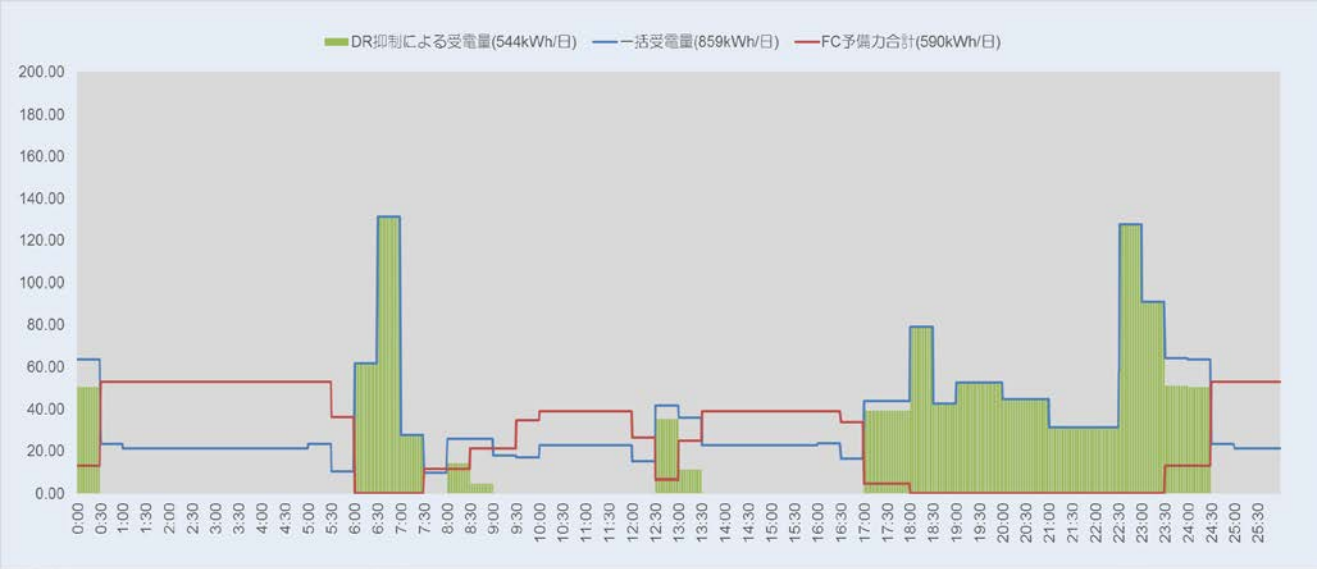

図 7 集合住宅モデル全体の一括受電量（青線）と FC 予備力合計（赤線）および DR-E による一括受電量の抑制効果（推定）（緑部）〔厳寒期〕（平日）

参考文献

1) 経済産業省 HP；電力の小売全面自由化について http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/ （アクセス日 2015.11.21）

2) 経済産業省；ネガワット取引に関するガイドライン（平成 27 年 3 月 30 日）

3) 経済産業省；ネガワット取引の普及に向けた取組，総合資源エネルギー調査会 省エネルギー小委員会（第 11 回）配布資料（平成 27 年 3 月 31 日）

4) 東京ガス HP；マンション向けエネファーム、誕生。 http://home.tokyo-gas.co.jp/enefarm_special/mansion/（アクセス日 2015.11.22）

5) コージェネ財団 HP；エネファームメーカー販売台数 http://www.ace.or.jp/web/works/works_0090.html （アクセス日 2015.11.21）

6) 杉本，安芸；熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討，第 33 回エネルギー・資源研究発表会，2014 年 6 月.

7) 杉本，安芸；熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討（その 2），第 31 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，2015 年 1 月.

8) 小澤，吉田；マルコフ連鎖を用いた生活行動再現による家庭エネルギー需要の推定，環境情報科学 学術研究論文集 27（2013）

9) 西尾，浅野；世帯の多様性を考慮した家庭部門エネルギー需要生成ツールの開発，電力中央研究所研究報告，Y05008，2006 年 4 月.

10) J. Widen，et.al；Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data-Modeling approach and validation，Energy and Building 41（2009），pp. 753 - 768.

11) NHK 放送文化研究所；2010 年国民生活時間調査 報告書（平成 23 年 2 月）

12) 総務省 国勢調査；世帯の種類，世帯人員別世帯数及び世帯人員（昭和 55 年 - 平成 22 年）

13) 建築環境・省エネルギー機構；省エネ法 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説（2010 年 3 月版）

14) 櫃田直人；集合住宅共用部のエネルギー消費特性とその PV 利用に関する研究，修士論文，三重大学，2001

15) 東京ガス HP；エネファーム http://home.tokyo-gas.co.jp/enefarm_special/enefarm/specific.html（アクセス日 2015.11.27）

16) 小池；東京ガスにおける家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの商品開発について，水素エネルギーシステム，Vol.30，No.1(2006)

17) 中島，澤田，越智；大阪ガスにおける家庭用 PEFC コージェネレーションシステム開発の取り組み，水素エネルギーシステム，Vol.30，No.1(2006)