

熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討（その4）

CHP-based Demand Response to Enable the Integration of Variable Renewable Energy

杉本 一郎*・安芸 裕久**・毛 笠明志***

Ichiro Sugimoto

Hirohisa Aki

Akeshi Kegasa

Japan has freed up the retail power market since April 2016 and is going to set up the negawatt power market by 2017. In Japan, residential fuel cells (FCs) as micro-CHP systems have been released since 2009 and installed over 180,000 sets until September 2016. Demand Response (DR) aggregating residential FCs is expected to play a new role in the negawatt market. Previously, we proposed an apartment house model, which has less than 100 dwelling units equipped with built-in FCs. And we evaluated the effects of electric load control by CHP-based DR quantitatively both in a hot summer day and in a cold winter day.

In this paper, we regard the apartment house model as a load modifying resource (LMR), and quantify the LMR capacity accommodating variable renewable energy in the residential area which includes household photovoltaic systems and the apartment house model.

Keywords : demand response, combined heat and power, load modifying resource

1. まえがき

日本では電力システム改革の一環として、2016年4月から電力小売りの全面自由化が実施され、2017年中にデマンドレスポンス（以下、DRと略す）を活用したネガワット取引市場の創設が計画されている¹⁾。また日本では、家庭用超小型コージェネレーション設備（以下、CHPと略す）として、戸建住宅向け設置用燃料電池（以下、FCと略す）が2009年6月に、集合住宅向けFCが2014年4月に発売され²⁾、2016年9月末までの約7年間で合計18万台以上が設置・導入されている³⁾。

本研究では、1棟100戸以下の規模の集合住宅（共用部を含む）を対象に、各戸に集合住宅向けFC（PEFCを対象とする）が装備され、棟屋全体で系統電力と都市ガスが一括連系・供給される「集合住宅モデル」を設定する。電力・ガスの小売事業者・アグリゲータ等からの電力・ガス量のDR要請に対応して、各戸のFCの発電予備力を活用して、棟屋全体の電力負荷プロファイルまたは熱負荷量を制御する機構と、CHPが有する稼働制約を取り除きFCの稼働を促進する行動・仕組みを合わせた、「熱・電気を統合した

デマンドレスポンス」について検討を行っている。

これまで第1報では、集合住宅モデルが電力のDR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⁴⁾。第2報では、都市ガスのDRを想定して、集合住宅モデルが都市ガス量を抑制する仕組みとして、「熱負荷量の制御機構」と「電力消費シフト行動」を提案した⁵⁾。また第3報では、冬期・夏期の電力ピーク期において、電力負荷プロファイル制御機構による集合住宅モデルのDR抑制効果を定量化した⁶⁾。

本稿では、集合住宅モデルをロード・モディファイ・リソース（Load Modifying Resource：以下、LMRと略す）と捉えて、自然変動電源の出力変動を吸収する能力（LMR容量という）について定量化する。特に、同一配電系統に属する住宅地域において、集合住宅モデルが住宅用太陽光発電（以下、PVと略す）の「中間期のランプ変動（Ramp Down）⁷⁾」をどの程度緩和し収容できるかを定量的に検討する。

まず、集合住宅モデル（住宅数100戸）の中間期における住宅部の電力・温水需要と共用部の電力需要を、冬期・夏期と同様のボトムアップ手法⁶⁾で作成する。

次に、類型化した電力・温水需要ごとに、通常モードでのFC稼働シミュレーションを行い、集合住宅モデル全体のFC発電出力を積算する。また、共用部の電力需要を勘定して、中間期における集合住宅モデルの（系統からの）一括受電プロファイルを算定する。

*株式会社エネルギー・生活科学研究所

〒563-0022 大阪府池田市旭丘3-6-2

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

〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1 つくば中央第5

***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

さらに、集合住宅モデル全体のFC発電予備力を算定し、FCを「電力負荷プロファイル制御（一括受電量を最小化）」または「定格容量まで増強出力（棟外への逆潮流を認める）」した場合のLMR容量（DR効果）を推定し、中間期・夕方のPVの出力変動に対する緩和能力について考察する。

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一括連系され、各戸の電力は双方向のスマートメータで計量されているものとする。（モデルの詳細は文献4）を参照）

PVの出力変動が問題となる中間期⁷⁾（例えば、3月～5月）をDR要請の対象時期として、当該時期の集合住宅モデル（住宅部と共用部）の電力需要と温水需要のプロファイルを、冬期・夏期と同様の手法で作成する。（作成手順の詳細は文献6）を参照）

2.1 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⁸⁾と家電機器を関連付けて、外出時間帯の分類（平日と休日、AM外出とPM外出）ごとに、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。中間期の電力需要は、冬期・夏期と比べ、暖房・冷房需要がなく、冷蔵庫・便座の消費電力を調整したものとなる。

また住宅部の温水需要は、給水温度を15℃として、IBEC「修正M1モードの平日（小）」⁹⁾（1世帯4人を想定）を基に、1世帯2.5人¹⁰⁾向けに修正する。さらに中間期の温水需要は、居住者の入浴スタイルから以下の4つに類型化し、入浴による温水需要の時刻分布を変更する。

（中間期） 浴槽使用（夜）、シャワー（夜）、シャワー（朝）、シャワー（朝・夜分散）

図1に、集合住宅モデルにおける、中間期・平日・AM外出型・浴槽使用の住宅1戸平均の電力需要と温水需要のプロファイルを示す。

2.2 共用部の電力需要プロファイルの作成

近年の共用設備の消費電力・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設備は、調査時点（2014年4月）での最新設備の消費電力を採用する。共用部の電力需要は、共用設備の設置台数・使用頻度・稼動時間帯等を設定し、各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。中間期の電力需要は、冬期・夏期と比べ、空調需要（暖房・冷房）がなく、照明の使用時間帯を調整したものとなる。

図2に、集合住宅モデルにおける、中間期・平日の住宅部（100戸）と共用部の電力需要の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、2016年11月時点で最新の集合住宅向けPEFCの仕様¹¹⁾を参考に、以下のように設定する。（仕様の詳細は文献6）を参照）

（FCの諸元（概要））

- ・発電出力 0.70 kW (0.20 - 0.70 kW)
- ・発電効率 35.2 % (HHV)
- ・排熱出力 1.01 kW (0.21 - 1.01 kW)
- ・排熱回収効率 50.6 % (HHV)
- ・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 (PEFC)
- ・貯湯槽 140 L (貯湯温度 60℃)
- ・補助熱源 潜熱回収型ガス瞬間式 (熱効率 95 %)

FCの通常モード（自動発電モード）での運転パターンは、FCが自家の1日単位の電力・温水需要実績（プロファイル）を毎日蓄積し、その蓄積データから翌日の温水需要プロファイルを予測し、「Daily Start and Stop (DSS)」を基調として運転計画を立案する。FCの稼動は、深夜のある時点（例えば、AM2:00）を起点として、運転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・貯湯した時点で運転を終了する。また不足分の温水は補助熱源により充当する。

本研究における通常モードのFC稼動シミュレーションは、以下の運転条件・稼動制約の下で実施する。（稼動シミュレーションの詳細は文献6）を参照）

（運転条件）

- ・FCは1日1回のDSS運転を行う
- ・翌日の電力・温水需要プロファイルは正確に予測されるものとする
- ・FCの発電出力は50W単位とし、自家の電力需要を上回らないものとする
- ・所定の温水量とは「一定時間内の最大温水需要」とし、使用直前までに生成・貯湯することを目指す
- ・1日の終了時点で貯湯槽に温水は残さない（不足分は補助熱源により充当）
- ・貯湯槽の放熱損失は考慮しない

（稼動制約）

- ・FC起動時の「冷機運転」は1時間とし、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になった場合は「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は放熱を行わずに運転を終了する（つまり、FCは貯湯槽を満水にしないように運転する）



図1 集合住宅モデルの住宅1戸平均の電力需要と温水需要プロファイル（中間期・平日・AM 外出型・浴槽使用）

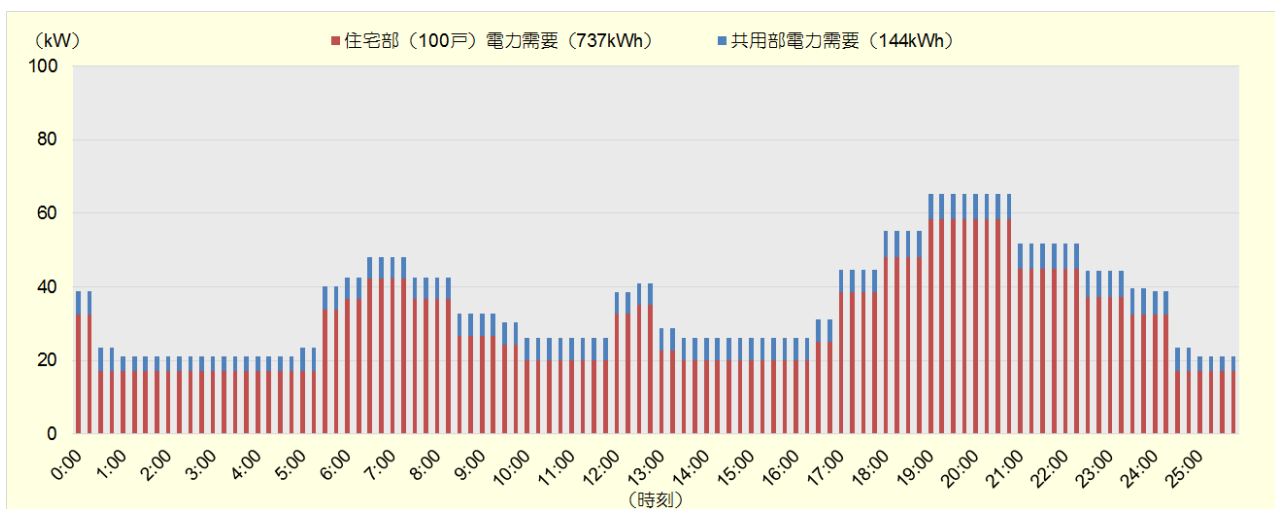


図2 集合住宅モデルの住宅部（100戸）と共用部の電力需要プロファイル（中間期・平日）

図3-1に、「中間期・平日・AM 外出型・浴槽使用」の場合の住宅1戸平均の電力需要とFC稼働結果（発電出力）を、図3-2に、同様の場合の住宅1戸平均の温水需要と貯湯槽の温水熱量の推移を示す。

4. FC 予備力による LMR 容量の推定

集合住宅モデル全体の一括受電量は、中間期の入浴類型ごとに、冬期・夏期と同様の手順で、AM 外出型の住宅 50 戸と PM 外出型の住宅 50 戸の合算した電力需要から、FC 発電出力合計（計 100 台）を差し引き、共用部の電力需要を加算して算定される。（算定手順の詳細は文献 6）を参照）

図4-1に「中間期・平日・浴槽使用」の場合の住宅部（100 戸）の電力需要プロファイルと FC 発電出力合計（100 台）を、図4-2に同様の場合の住宅部（100 戸）の（系統からの）買電量合計と集合住宅モデル全体の一括受電量を示す。

集合住宅モデルを LMR と捉えた時、図4-2に示す一括受電量は、DR におけるベースラインと位置付けられる。また DR の方策は、集合住宅モデルの FC 予備力（FC の定格容量

と自家向けの発電出力の差）を LMR 容量として、電力負荷プロファイル制御により「一括受電量を最小化する（最小値 = 0）」の範囲内で PV の出力変動（Ramp Down）を緩和する方策と、最大値（定格値）まで増強出力（ブースティング）し、「棟外への逆潮流を行う」まで拡張して PV の出力変動を吸収する方策が考えられる。

FC 予備力は図4-1の FC 発電出力から算定でき、図4-2の一括受電量を差し引くと、棟外逆潮流量が算出される。

図5に、「中間期・平日・浴槽使用」の集合住宅モデル全体の一括受電量、FC 予備力の合計、定格値まで FC をブースティングした場合の棟外逆潮流量（-値で表記）を示す。

4.1 電力負荷プロファイル制御による方策

電力負荷プロファイル制御による DR では、図5の棟外逆潮流がすべての時間帯で可能なことから、集合住宅モデルの「一括受電量 = 0」が達成できる。つまり、ベースラインの一括受電量の範囲内での PV のランプ変動（Ramp Down）を緩和できる。

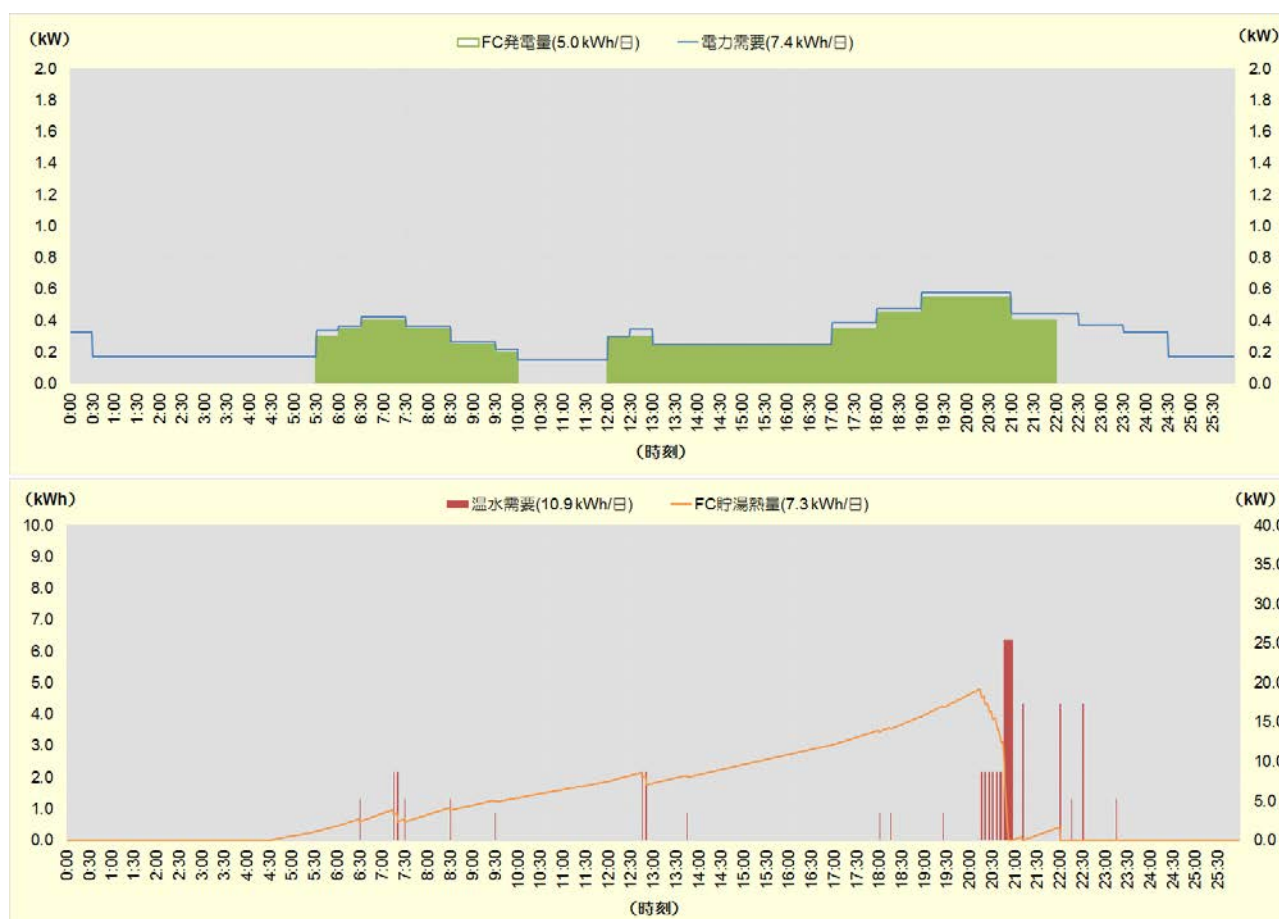


図 3-1 (上) 住宅 1 戸平均の電力需要と FC 発電出力 (中間期・平日・AM 外出型・浴槽使用)

図 3-2 (下) 住宅 1 戸平均の温水需要と貯湯槽の温水熱量 (同上)

具体的には、中間期の時間帯「16:00 - 19:00」における住宅用 PV の出力低下を「1 時間当たり 1 kW Down」と想定すると、電力負荷プロファイル制御では、LMR 容量は「6 kW - 13 kW (平均 10 kW)」となる。

この LMR 容量 (平均 10 kW) は、概算的には住宅用 PV20 セット (= 10 kWh / 0.5 kWh) 程度の出力変動 (低下) しか緩和できず、2030 年の住宅用 PV の普及率を 10 % と想定すると (2013 年度時点で普及率 3.0 %¹²⁾)、200 軒程度の住宅地域に 1 棟 100 戸の集合住宅モデルが必要となり、計算上でも実現の可能性は低い。

4.2. FC 最大値までのブースティングによる方策

FC 予備力をすべてブースティングして、棟内の逆流流だけでなく棟外への逆流流を行う方策は、図 5 の FC 予備力合計から、中間期の時間帯「16:00 - 19:00」における住宅用 PV の出力低下を前節と同様とすると、LMR 容量は「25 kW - 58 kW (平均 37 kW)」となる。

この LMR 容量 (平均 37 kW) は、概算的には住宅用 PV75 セット (= 37 kWh / 0.5 kWh) 程度の出力変動を吸収できると推定され、前節と同様の住宅用 PV の普及率を想定する

と、700 - 800 軒程度の住宅地域に 1 棟 100 戸の集合住宅モデルが必要な勘定となる。これは一配電系統 (概ね 1,000 軒) 内に、住宅用 PV が 7 % - 8 % 程度普及し、1 棟 100 戸または 2 棟各 50 戸の集合住宅モデルが配備されているケースであり、計算上は実現の可能性が高いと考えられる。

ただし、集合住宅モデルの一括連系点 (6.6 kV) で逆流流を行うことは、住宅用 PV の逆流流による出力変動と共に、需要地系統に不安定要素を与えることになり、技術面、設計面、運用面等での詳細な検討が必要となる。

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 4 報として、集合住宅モデルを LMR と捉え FC 予備力を LMR 容量として、中間期の住宅用 PV の出力変動 (低下) をどの程度収容できるかを定量的に推定した。

その結果、FC 予備力をすべてブースティングする方策を採ると、一配電系統 (概ね 1,000 軒) 内に集合住宅モデルを 1 棟 (100 戸) 配備すれば、住宅用 PV (普及率 7 - 8 %) の中間期の出力変動 (低下) を吸収できる可能性があると判明した。

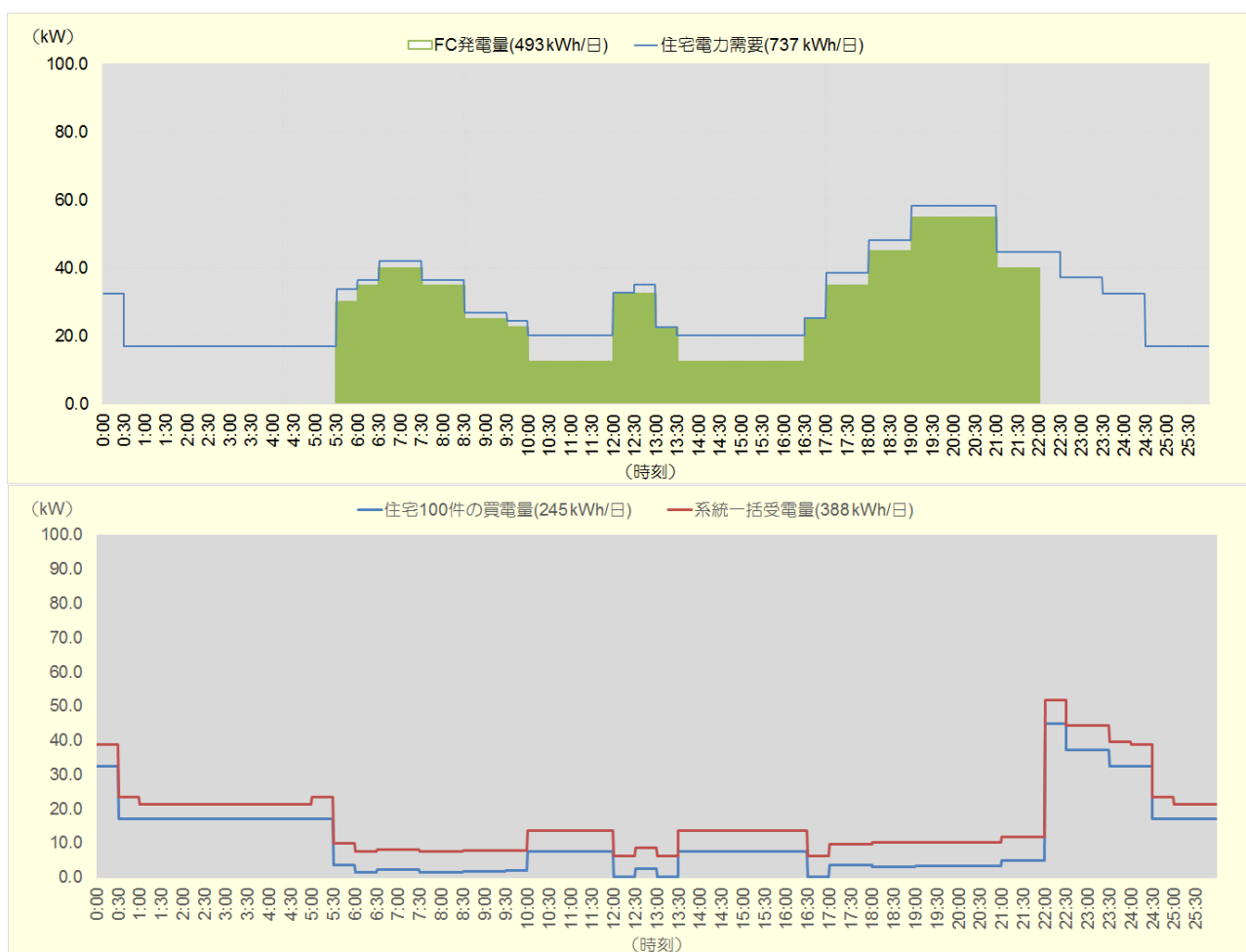


図 4-1 (上) 集合住宅モデルの住宅部 (100 戸) の電力需要プロファイル (青線) と FC 発電出力 (100 台) (緑部) (中間期・平日・浴槽使用)

図 4-2 (下) 集合住宅モデルの住宅部 (100 戸) の買電量合計 (青線) とモデル全体の一括受電量 (赤線) (同上)

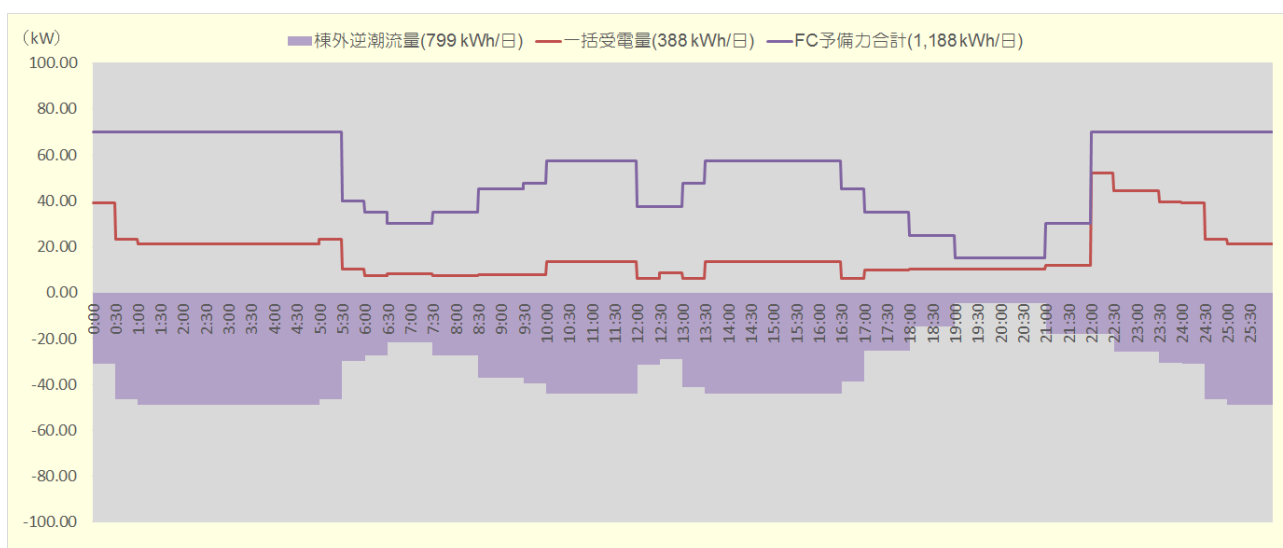


図 5 集合住宅モデル全体の一括受電量 (赤線), FC 予備力合計 (紫線), 棟外逆潮流量 (紫部) (中間期・平日・浴槽使用)

参考文献

- 1) 経済産業省；電力システム改革の現状と課題，総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 電力システム改革貫徹のための政策小委員会（第1回）配布資料（平成28年9月27日）
- 2) Tokyo Gas and Panasonic；“World’s First ‘Ene-Farm’ Home Fuel Cell for Condominiums to Be Released,” Oct. 21, 2013.
http://www.tokyo-gas.co.jp/Press_e/20131021-01e.pdf（アクセス 2016.11.24）
- 3) 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/fc/works_0010.html
（アクセス 2016.11.24）
- 4) 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．
- 5) 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．
- 6) 杉本，安芸，毛笠；熱・電気を統合したデマンドレスポンスの検討（その3），第32回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，2016年2月．
- 7) California ISO；“Demand Response and Energy Efficiency Roadmap: Maximizing Preferred Resources,” December 2013
- 8) 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）
- 9) 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）
- 10) 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）
- 11) 東京ガス，パナソニック；マンション向け家庭用燃料電池「エネファーム」の新製品発売について（平成28年2月29日）
<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20160229-01.html>
（アクセス 2016.11.24）
- 12) 総務省統計局「平成25年住宅・土地統計調査（速報集計）結果の概要」（平成26年7月29日）