

スマートタウンにおける燃料電池CGSの共有シミュレーション Effects of Storage Battery Operation and Electricity Fusion in Smart Towns

○佐藤駿*、石雲鵬**、市村知輝***、湯浅和博****
Shun Sato, Yunpeng Shi, Tomoki Ichimura, Kazuhiro Yuasa

keywords : Fuel Cell CGS , Simulation , HEMS data , Smart Towns
燃料電池CGS、シミュレーション、HEMSデータ、二世帯共有、スマートタウン

1. はじめに

民生家庭部門のエネルギー消費削減に向け、家庭用燃料電池CGSは普及しつつあるが、稼働率の向上が課題となっている。既往研究^{1)~4)}では、複数世帯での家庭用燃料電池の共有による稼働率の向上が試算されているが、平均的な生活行為に基づき算出されたエネルギー需要に基づいたもので、様々な住宅のばらつきは考慮されていない。本研究ではHEMSデータに基づく住宅のエネルギー消費実態と燃料電池CGSの稼働実態を明らかにし、FSSTの29世帯の住宅のHEMSデータをもとに、燃料電池CGSの共有シミュレーションを行い、エネルギー消費のばらつきを考慮して、有効な二世帯共有のあり方を示すことを目的とした。

2. 対象住宅のエネルギー消費実態

2.1 調査概要

表1に調査概要を示す。Fujisawaサスティナブルスマートタウン（以下、FSST）の固体高分子形燃料電池（以下、PEFC）を設置した住宅368世帯のうち協力を得られた住宅29世帯を対象とする。対象期間は、中間期（5月）、夏期（8月）、冬期（2月）の晴天日、曇天日、雨天日を含む一週間とした。HEMSデータの測定間隔は30分で、測定項目は、住宅全体電力消費量、PV発電量、PEFC発電量、買電量、売電量、PEFC給湯消費量、補助熱源給湯消費量、PEFCガス消費量、補助熱源ガス消費量、住宅全体水消費量である。

表2に機器概要を示す。PEFCの出力範囲は200~750Wであり、起動時間は50分である。PEFCの稼働時間と発電量はAIで過去の電力・給湯消費量に基づく学習によって決定される。貯湯槽は容量147L、貯湯温度60~65℃であり、満蓄になる際に、PEFCは運転を停止する。

2.2 電力諸量の調査結果

図1にA世帯を例に冬期一週間のPEFC発電量、PV自家消費量、買電量、PV売電量の時間変化を示す。日中の電力消費の大半はPEFC発電とPV発電で賄われ、PEFC発電は売電できないため、PV発電よりも優先的に使用される。

図2に5月、8月、2月の1週間における29世帯の一日積算の電力消費量・PEFC発電量の平均値と日平均外気温の関係を示す。PEFC発電量は気温が高いほど小さくなる。これは、外気温とともに給湯温度が上昇し、給湯負荷が減少するためである。一方で電力消費量は、2月と5月は気温が高いほど小さく、8月は大きくなる。PEFCの発電量は家庭の電力需要よりも熱需要に影響を受けて決定されている。

2.3 PEFCの寄与率

図3に2月における全世帯一週間のPEFC発電量・電力消費量の積算値と5月、8月、2月のPEFCの寄与率（電力消

表1 調査概要

対象住宅		Fujisawaサスティナブルスマートタウンの燃料電池を設置した戸建住宅29世帯	
対象期間		晴・曇・雨天日を含む一週間	代表日
中間期	2021年5月	22日（土）— 28日（金）	23日
夏期	2021年8月	2日（月）— 8日（日）	2日
冬期	2022年2月	12日（土）— 18日（金）	18日
HEMS		測定間隔	30分
測定項目		電力：住宅全体電力消費量・PV発電量・PV売電量・買電量・燃料電池発電量 お湯：PEFC給湯消費量・補助熱源給湯消費量 ガス：家全体ガス消費量・燃料電池ガス消費量・補助熱源ガス消費量 水：住宅全体水消費量	

表2 機器概要

燃料電池	燃料電池形式	固体高分子形燃料電池（PEFC）	
	定格出力	750W	出力範囲 200~750W
	熱回収温度	60~80℃（安定時）	定格時発電効率 35.2%HHV
	定格時熱回収効率	50.6%HHV	起動時間 50分
発電開始・停止時間	発電開始：過去の電力・給湯消費量に基づく学習による決定 発電停止：学習による決定、貯湯槽が満蓄になると停止 一日の最大発電時間は20時間		
貯湯槽	容量は147L、貯湯温度は60~65℃		

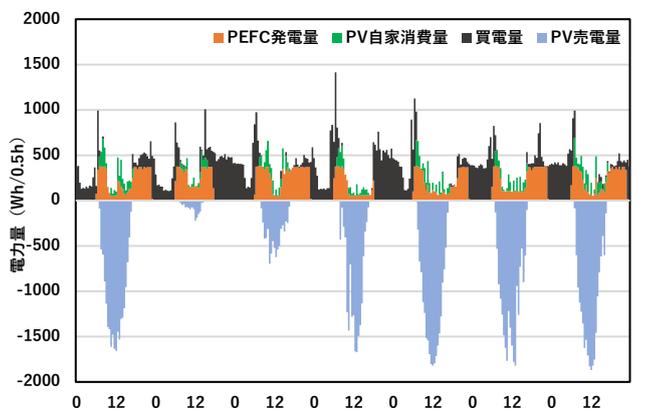


図1 2月の電力諸量（A世帯）

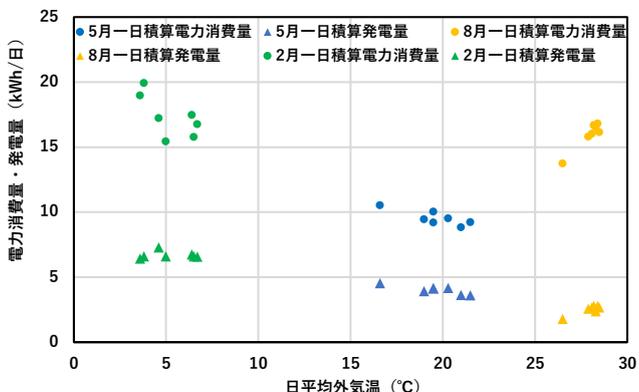


図2 外気温と電力消費量・PEFC発電量の関係

*東京科学大学環境・社会理工学院 修士課程 **東京工業大学（現東京科学大学）修了

東京科学大学環境・社会理工学院 博士課程 *東京科学大学環境・社会理工学院 准教授・工博

* Graduate Student, Institute of Science Tokyo **Tokyo Institute of Technology

*** PH.D. Candidate, Institute of Science Tokyo ****Associate Prof, Institute of Science Tokyo Dr.Eng

費量に対するPEFC発電量の割合)を示す。2月と5月のPEFCの寄与率はおおよそ20~65%の区間であり、8月は25%以下である。K、S、I世帯は電力消費量が小さいが、K世帯のみ熱消費量が大きいのでK世帯のPEFC発電量も大きく寄与率が高い。また、Y、W、R世帯の電力消費量は同程度だが、熱消費量はY、W、R世帯の順に大きく、そのためPEFC発電量もY、W、R世帯の順に大きく寄与率が高い。

3. 燃料電池の稼働実態

3.1 起動時・連続運転時の実態

図4(1)に対象期間における29世帯のPEFCの起動時のガス消費量の分布を示す。0.025m³であるデータ数が最も多い。HEMSデータより得られた最頻値0.025m³をシミュレーションに用いることとする。

図4(2)に前後の時間帯のPEFC発電量が100Wh/0.5h以上、間の時間帯が100Wh/0.5h未満の場合のPEFC発電量のデータ分布を示す。PEFCの出力範囲は1時間あたり200~750Wであるが、前後の時間帯の電力需要からON、OFFをするよりも低出力で運転した方が有利であると判断されたため、100Wh/0.5h未満の場合のPEFC発電量のデータが存在すると思われる。75Wh/0.5h以上のデータ数が多いため、シミュレーションでは75Wh/0.5hを最低出力とする。

3.2 発電効率の部分負荷特性

図5に2月のD世帯の修正前後の部分負荷率と発電効率の関係を示す。生データは運転起動・停止時間と計測された時間にずれが生じる場合があり、この時間帯には30分毎のデータを修正する必要がある。この場合、ガス消費量は前後の時間帯に計測されることがあるため、前後の時間帯のガス消費量と発電量を足し、平均化して修正した。また、実際の運転起動・停止時間を確認する方法がないため、修正後も部分負荷率の計算時は30分間の最大出力で除した。

図6にD世帯の5月、8月、2月における部分負荷率と発電効率の関係を示す。部分負荷率が20~50%の区間では、5月の発電効率は2月の発電効率より高く、部分負荷率が50~70%の区間では、8月の発電効率は2月の発電効率より高い。

図7に29世帯の5月、8月、2月における10%ごとの部分負荷率と発電効率の関係を示す。部分負荷率20%における発電効率は19~21%の平均値とし、10%ごとに同様の算出を行った。部分負荷率が60~90%の区間では、発電効率の変化が殆どない。

図8に29世帯の5月、8月、2月の運転における、部分負荷率10%毎の稼働時間と頻度を示す。運転総時間について、5月と2月は同程度で、8月が最も少ない。5月は、50%以下の低部分負荷率で運転することが多い。一方、8月は運転総時間が短いものの、2月と同じく部分負荷率が90%以上で運転することが多い。

3.3 燃料電池の部分負荷特性

図9に5月、8月、2月における発電効率、排熱回収効率、総合効率の特性式を示す。発電効率の特性式は図3の平均値をもとに得た。部分負荷率が60~90%の区間では、発電効率の変化が殆どないため一定とした。各季節の排熱回収効率の特性式は総合効率から発電効率を引くことで推定した。

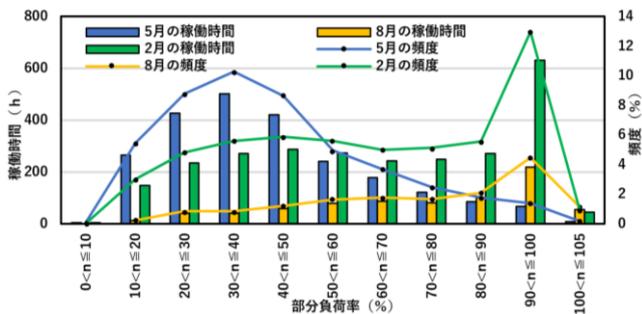


図8 部分負荷率10%ごとの季節別稼働時間と頻度

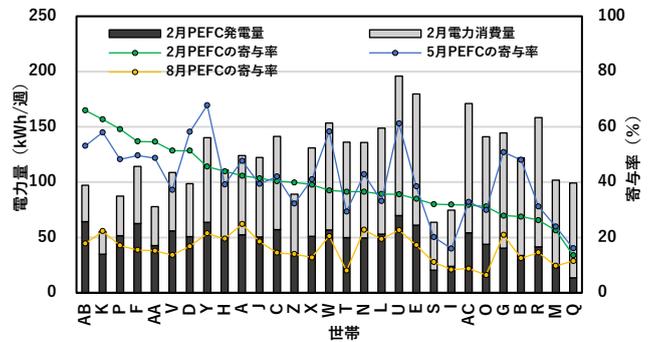
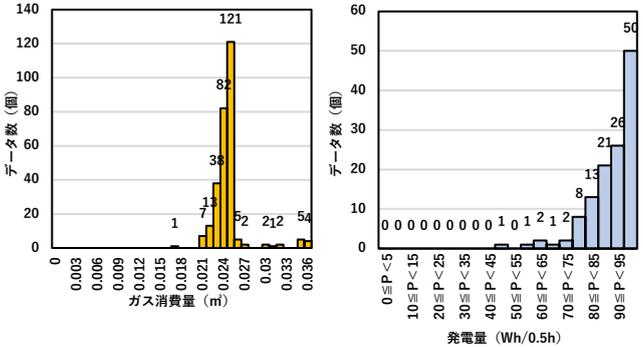
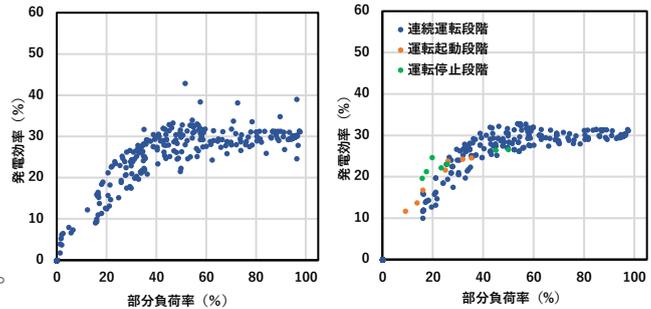


図3 全世帯一週間のPEFCの寄与率



(1) 起動時のガス消費量 (2) 連続運転時の最低発電量

図4 起動時・連続運転時の実態



(1) 修正前 (2) 修正後

図5 2月の修正前後の部分負荷率と発電効率 (D世帯)

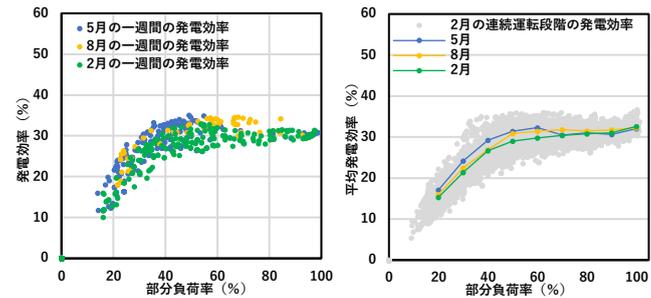


図6 季節別の部分負荷率と発電効率 (D世帯)

図7 季節別の部分負荷率と10%ごとの発電効率

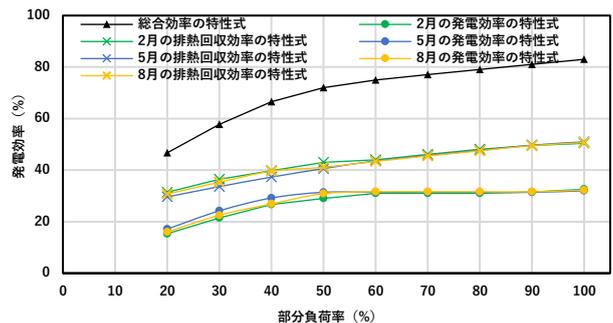


図9 部分負荷特性の設定

総合効率は既往の文献⁵⁾⁻⁶⁾を参考に設定した。本研究では図9の部分負荷特性式を用いてシミュレーションを行った。

4. 燃料電池の二世帯共有シミュレーション

4.1 設備構成とシミュレーションフロー

図10に二世帯共有の設備構成を示す。二世帯共有では、FSSTに現在設置されている定格出力750WのPEFCと容量147Lの貯湯槽1台を用いて、三方弁と配電盤で二世帯に電力とお湯を供給する。PV発電電力は共有を行わず、各住宅で消費または、売電する。蓄電池はFSSTの現状の運用方法を条件とした。

図11に二世帯共有シミュレーションのフローを示す。PEFCは電力需要が小さい1~5時をスリープする設定とし、一日最大20時間の運転とした。3.1より、二世帯の電力需要量が75Wh/0.5h未満の場合、停止させる。PEFCの起動時間は50分で、停止時間は1時間以上となり、起動時に0.025m³のガスが消費される設定とする。PEFCは熱追従運転とし、貯湯槽の熱損失は考慮していない。PEFC発電量が住戸の電力需要を満たせない場合、PV発電、系統電力の順に使用する。蓄熱が熱需要を満たせない場合は、補助ボイラを使用する。また、代表日のエネルギー需要が2日連続発生するような助走期間を設定し、2日目のデータを用いた。

4.2 代表日の二世帯共有シミュレーション結果

図12に2月と8月における二世帯共有シミュレーションの電力について、図13に熱についての結果をA、B世帯を例に示す。5時にPEFCが運転を開始し、貯湯槽温度が上昇する。8時にはA世帯が多く熱を使用し、9時半には貯湯槽温度が給水温度に達する。10時から18時まで、PEFCが継続して高部分負荷率で運転する。18時以降、住戸で熱が消費され、貯湯槽温度は下降する。全体的に電力需要が比較的小さい

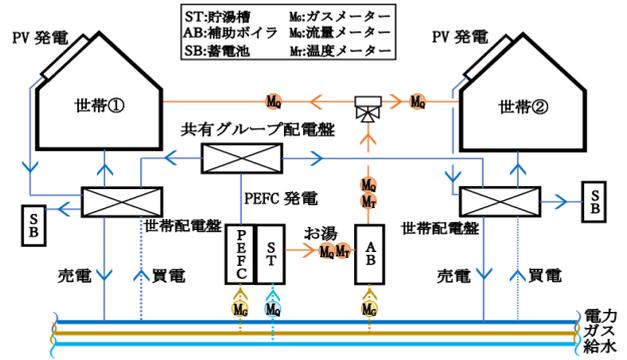


図10 二世帯共有の設備構成

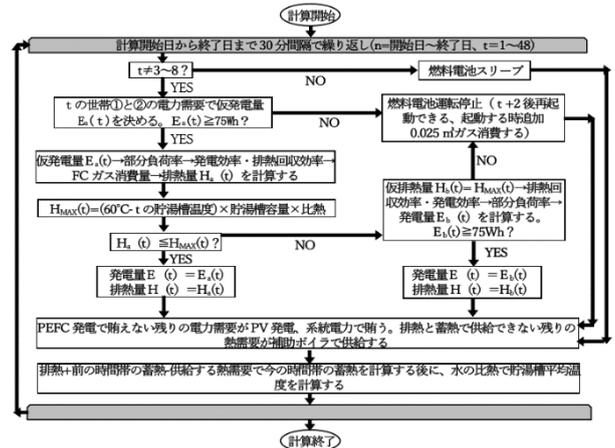
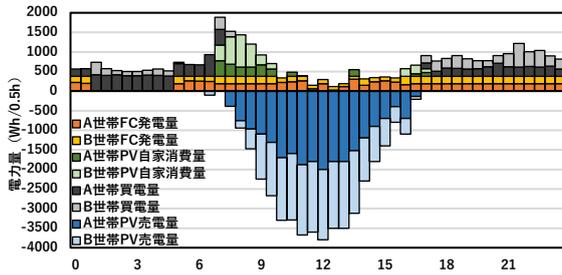
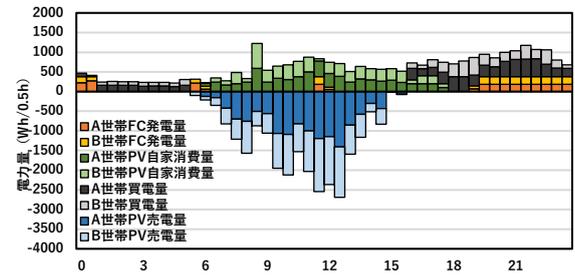


図11 シミュレーションのフロー

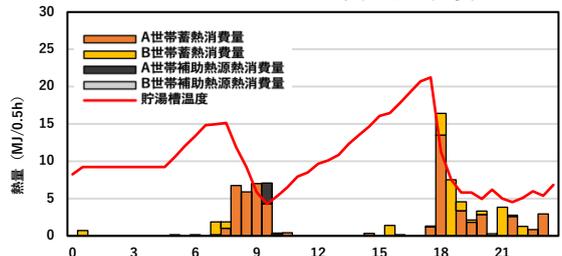


(1) 2月

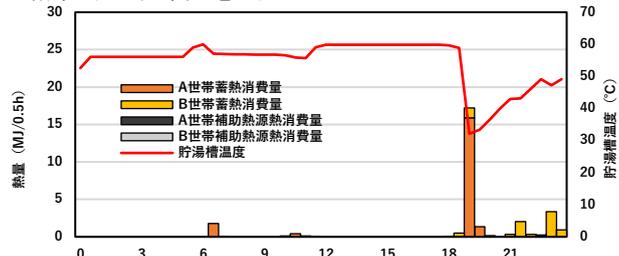


(2) 8月

図12 代表日のシミュレーション結果 (A+B世帯, 電力)

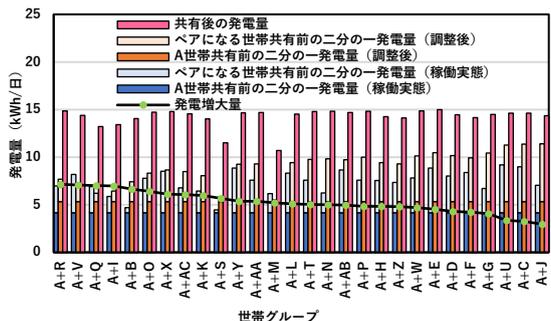


(1) 2月

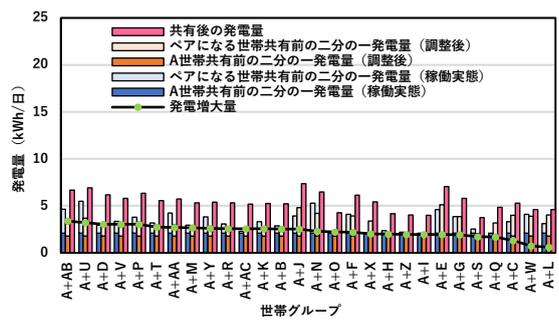


(2) 8月

図13 代表日のシミュレーション結果 (A+B世帯, 熱)



(1) 2月



(2) 8月

図14 A世帯とペア世帯の共有前後の発電量

12時頃を除き、1日20時間おおよそ定格運転したが、合計10kWhの買電量が発生した。8月においては熱需要が夜に集中し、日中の熱需要が殆どなく、稼働時間は2月と比べて短くなった。

4.3 代表日の二世帯共有シミュレーション結果

図14に2月、8月のA世帯とペア世帯の共有前後の発電量を示す。青色の部分はHEMSデータに基づく稼働実態であるが、前日のエネルギー消費の影響を受けるため、4.1のシミュレーション方法用いて調整した。共有後の発電量から、調整後の共有前の半分の発電量合計値を引き、発電増大量を得た。A世帯に対しては熱消費量が小さい世帯と共有すると効果が高く、熱消費量が大きい世帯と共有すると効果が低いことが分かった。また、熱消費量が大きい世帯は共有せずとも、高稼働率で運転できる。

図15に2月、8月の各ペア世帯の発電増大量とペア世帯の電力消費量と熱消費量の関係を示す。ペア世帯は任意の2世帯を抽出して、29世帯の全ての組み合わせ(406通り)について行った。電力消費量と発電増大量は有意な相関が見られなかった。熱消費量について、各世帯の最大消費量発生時とその前後の三つの時間帯の熱消費量の合計値の割合から、分散型と集中型に分類した。2月において、熱消費量は約冬期60MJ、夏期40MJ以下の範囲で正の相関が生じているが、それ以上では有意な相関が見られなかった。

4.4 発電増大量向上のための対策

図16に各世帯ペアの年間発電増大量と年間熱消費量の関係を示す。年間発電増大量と年間熱消費量は、5月、8月、2月を1:1:1の割合で365日分に換算して集計した。世帯ペアに対して発電増大量が異なるため、3つのタイプに分類した。Type1は年間発電増大量が1400kWh以上の発電増大量が大きい世帯ペアで、750Wを超える燃料電池を利用することで、より共有効果向上が期待できる可能性がある。Type2は熱消費量に対して発電増大量が大きくなり、原因の一つとして貯湯槽容量が小さいため発電増大量が小さいと考えられる。貯湯槽容量を拡大することにより発電増大量向上の可能性がある。Type3は熱消費量と発電増大量に正の相関が生じており、熱消費量が大きい程効果が高くなるため、二世帯以上の複数世帯で共有する対策が考えられる。

5. まとめ

本研究では、HEMSデータに基づく住宅のエネルギー消費実態と燃料電池CGSの稼働実態を明らかにし、FSSTの29世帯の住宅のHEMSデータをもとに、燃料電池CGSの共有シミュレーションを行い、エネルギー消費のばらつきを考慮して、有効な二世帯共有のあり方を提案した。HEMSデータに基づく住宅のエネルギー消費実態と燃料電池CGSの稼働実態の分析と二世帯共有シミュレーションの結果を以下に示す。

- 1) 住宅の電力消費量は、2月、8月、5月の順に、PEFC発電量は、2月、5月、8月の順に大きい。PEFCの発電量は、家庭の電力需要よりも熱需要に影響を受けて決定されている。また、2月と5月のPEFCの寄与率はおおよそ20~65%であり、8月は25%以下であり、季節別の運転総時間、部分負荷率、発電効率の関係を明らかにした。
- 2) 二世帯共有前後の日積算量比較を行い、共有後の発電量は共有前二台のPEFCの半分の発電量の差を発電増大量とした。発電増大量はおおよそ2~8kWh/日になり、二世帯共有による燃料電池の稼働率の向上が確認された。
- 3) 年間発電増大量と年間熱消費量から3タイプに分類し、それぞれに対して発電増大量のさらなる向上に関する提案を行った。

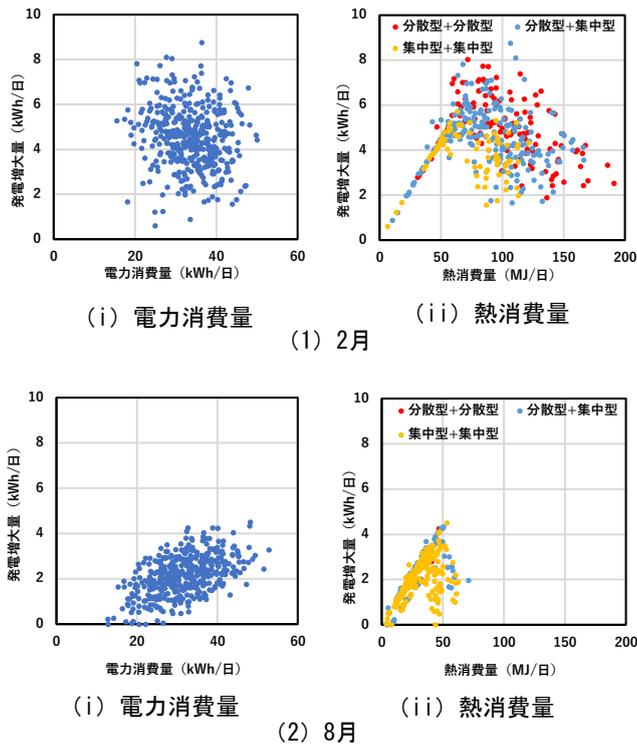


図 15 発電増大量と電力消費量・熱消費量の関係

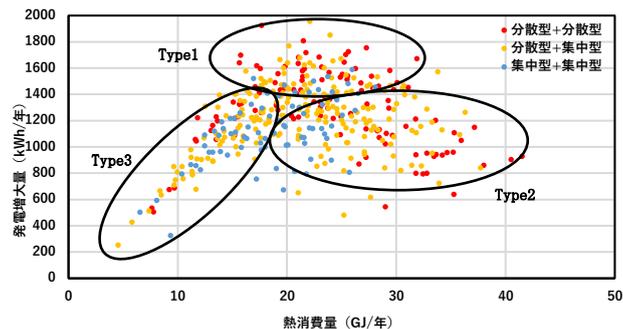


図 16 各世帯ペアの年間発電増大量と年間熱消費量

謝辞

本研究を進めるにあたり、各種データのご提供をいただきましたFujiisawaSSTマネジメント株式会社の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坂倉淳, 十河直人, 宮崎隆彦, 上田祐樹, 秋澤淳: 集合住宅における燃料電池の複数住戸共有による経済性向上, 第19回日本エネルギー学会大会講演要旨集, (2010. 8), pp. 370-371
- 2) 山本高広, 天辰公史郎, 住吉大輔: シミュレーションによる2世帯での燃料電池共有効果の推計, 日本建築学会環境系論文集, (2018. 4), pp. 365-374
- 3) 新野将平, 湯浅和博: 第1~2報集合住宅における固体酸化物形燃料電池CGSの共有に関する研究, 日本建築大会学術講演論文集, (2015. 9), pp. 1419-1422
- 4) 河野翔, 秋澤淳, 上田祐樹: 燃料電池を保有する家庭のエネルギー消費削減に向けた最適な省エネルギー行動の分析, エネルギー・資源学会論文誌, (2013), pp. 1-9
- 5) 山本高広, 住吉大輔, 崔榮晋: 実住宅を対象とした詳細計測に基づく家庭用燃料電池の省エネルギー効果および電力負荷追従性能に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, (2020. 1), pp. 45-54
- 6) 山本高広, 住吉大輔: スマートタウンにおけるHEMSデータを用いた家庭用燃料電池の実態分析, 日本建築学会技術報告集, (2018. 6), pp. 727-732