

博士論文

HEMS データを活用したエネルギー自立型住宅に関する研究

太田真人

第1章 序論

- 1.1 研究背景
- 1.2 研究の意義と新規性
- 1.3 研究概要
- 1.4 論文構成

第1章 序論

1.1 研究背景

18世紀の産業革命による「石炭」利用と20世紀中ごろのエネルギー流体革命による「石油」利用が、今日まで世界のエネルギー消費の中心となり、増加の一途をたどってきた。経済産業省資源エネルギー庁のエネルギー白書2020によれば、今後も世界人口の増加などを背景に、エネルギー消費量は増加（図1.1-1）¹⁾。また、エネルギー消費量のエネルギー源は石炭・石油・ガスで約85%（2018年時点）を占めており、これらから発生する温室効果ガスは、地球温暖化の原因とされている。2015年12月に開催されたCOP21（気候変動枠組条約締約国会議）においてパリ協定が採択され、2020年以降、産業革命前と比べた気温上昇を2度より下方に抑えること、更に1.5度まで抑えるよう努力することが盛り込まれた。

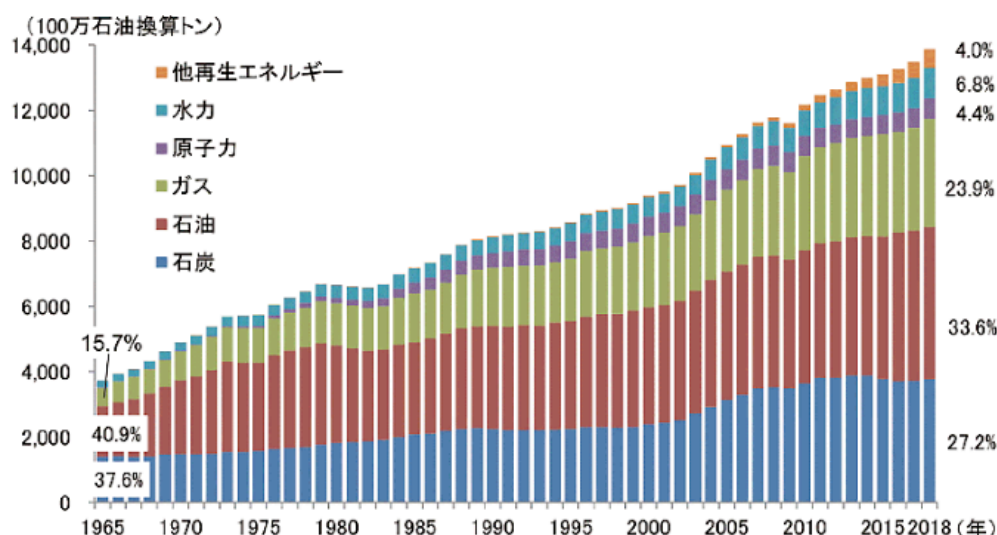


図1.1-1 世界のエネルギー消費量の推移（エネルギー源別、一次エネルギー）

（出典：エネルギー白書2020）¹⁾

国際エネルギー機関（IEA）2019年の報告によれば、気温の上昇を2度よりも十分に下げするために必要な処置を逆算した「持続可能開発シナリオ」は、2017年比で2040年までに世界のエネルギー需要全体は横ばいでも、石炭を中心とした化石エネルギーを大幅に削減し、原子力を除く、水力や太陽光を中心とした、再生可能エネルギーを2.4倍に増やすことが必要と示している。（図1.1-2）²⁾。

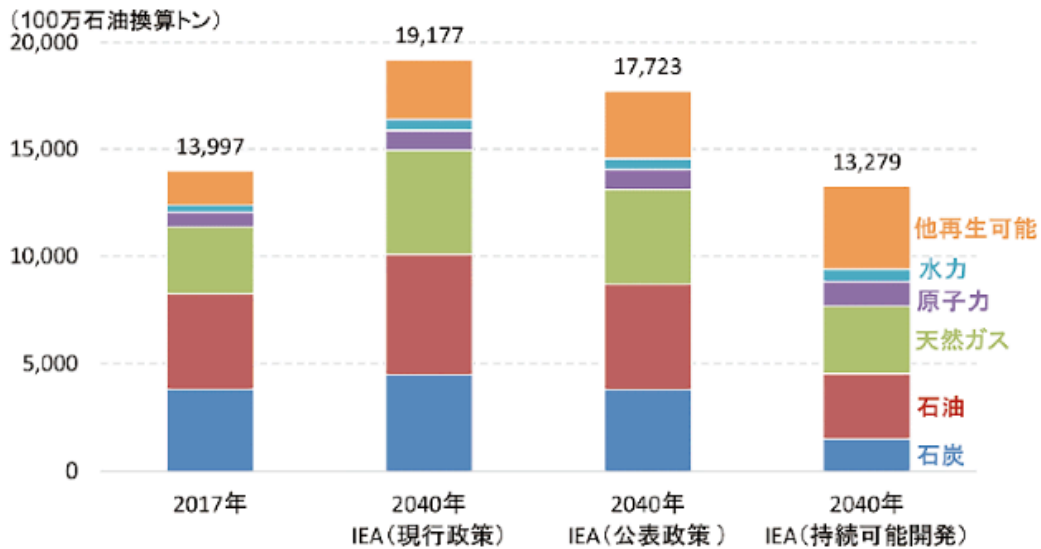


図1.1-2 世界のエネルギー需要展望
(出典:エネルギー白書2020、IEA「World Energy Outlook 2019」)²⁾

一方、国内のエネルギー需要は1965年以降急速に増大し、2000年代初頭をピークにやや減少したものの1965年と比較して現在も約3倍以上の需要となっている。また、石油への依存度は低下しつつも、2011年に発生した東日本大震災とその後の原子力発電所の停止により、天然ガスや石炭などの割合が増加し、化石エネルギーの依存度は91%と高い割合を占めている。(図1.1-3、図1.1-4:エネルギー白書2020より)²⁾

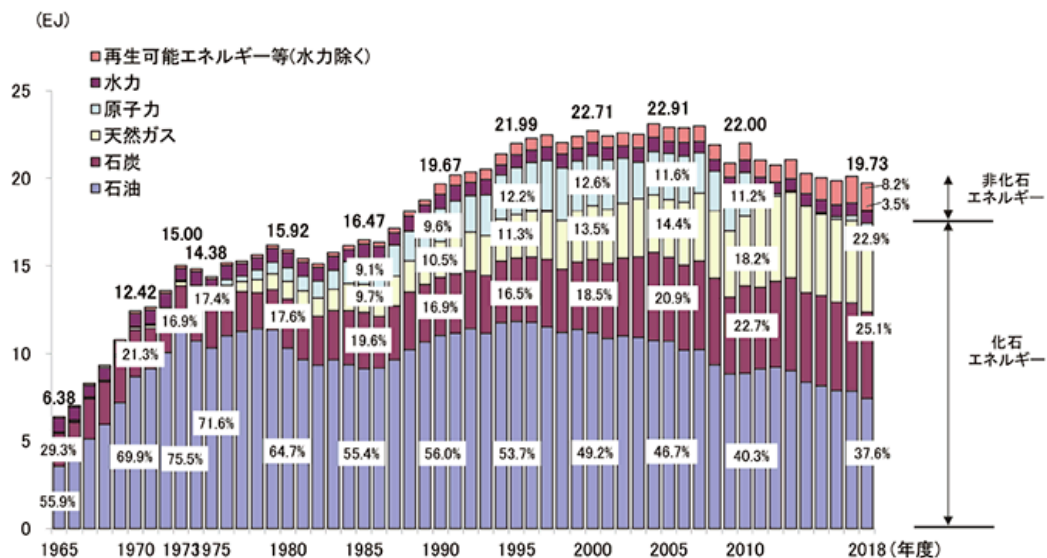


図1.1-3 日本国内の一次エネルギー供給推移 (エネルギー白書2020より)¹⁾

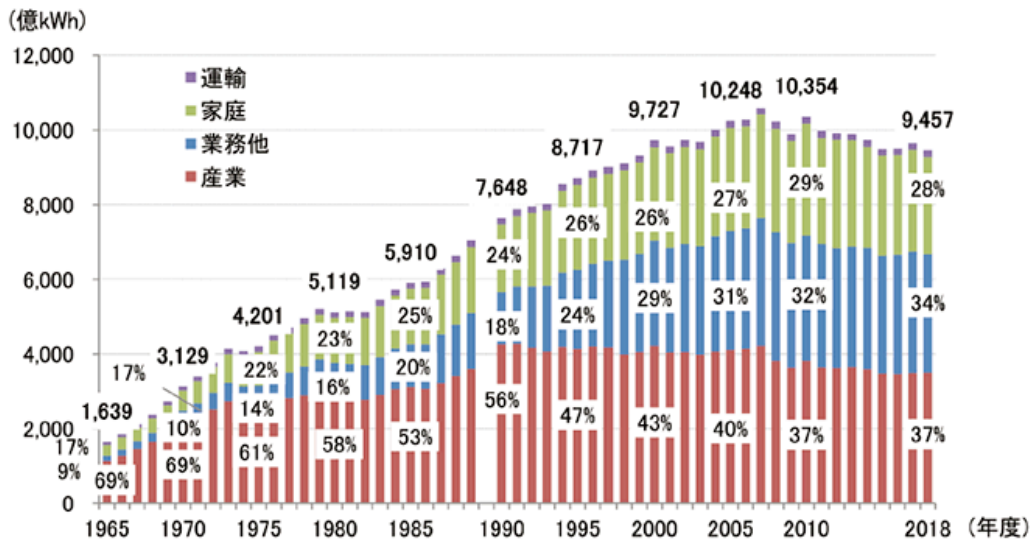


図1.1-4 日本国内における部門別電力消費エネルギーの推移 2)

また、電力消費エネルギーは石油ショックが発生した1973年以降も着実に増加し、2007年までの間に2.6倍に増大した。部門別では産業部門は依然として最大の電力消費部門だが、減少傾向に転じており、長期的に見ると、業務及び家庭といった民生用消費によって強く牽引されてきた。家庭部門では生活水準の向上、エアコンなどエネルギー利用機器の増加によって2005年度まで増大し、その後は高止まりが続いている。2)

住宅単体で自家消費を拡大させたモデル(ZEH+/次世代ZEH+)

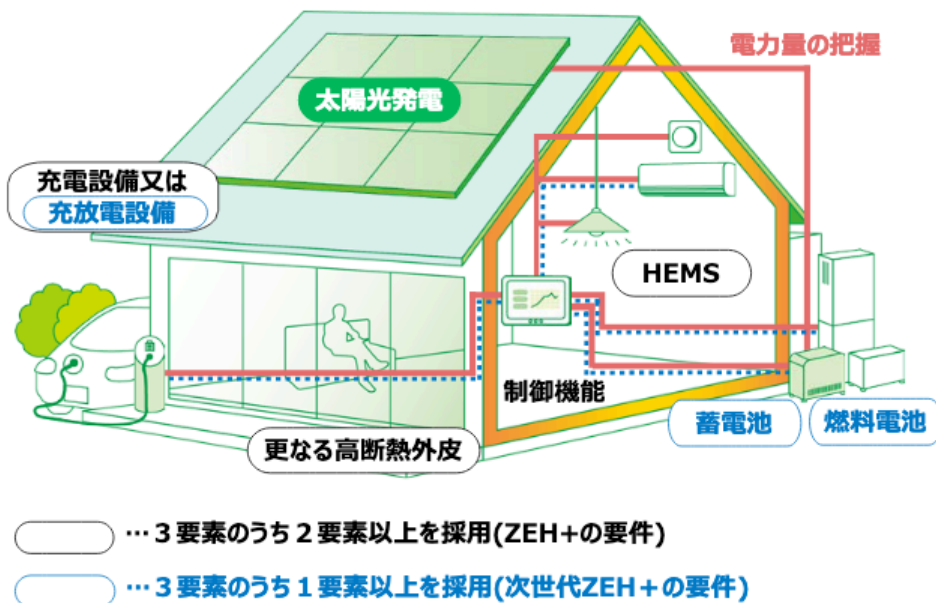


図1.1-5 自家消費を拡大したZEH+のモデル
 (経済産業省:再エネ型経済社会の創造に向けて 令和2年) 3)

家庭部門は、産業部門に比べ省エネのインセンティブが弱く、省エネが進みにくい分野だと言われている。そのため、エネルギー機器の効率や建材の高性能化を促す、「トップランナー制度」や一定規模以上の建築物のエネルギー消費性能基準への適合義務を創設（建築物省エネ法）するなど様々な取り組みを行っている。中でも、ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）普及に向けた取り組みは経済産業省、環境省、国土交通省など3省と民間が一体となり普及を推進している。更に最近では自家消費を拡大させたZEH+の普及が、①太陽光発電など再生可能エネルギーの普及 ②系統電力の安定 ③快適性の向上 ④災害時のレジリエンス性能の向上など 社会と需要家にとって価値が大きく期待されている。しかしながら新築注文戸建2019年度のZEH化率は20.5%に留まっている。（図1.1-5 自家消費を拡大したZEH+の概念図）³⁾

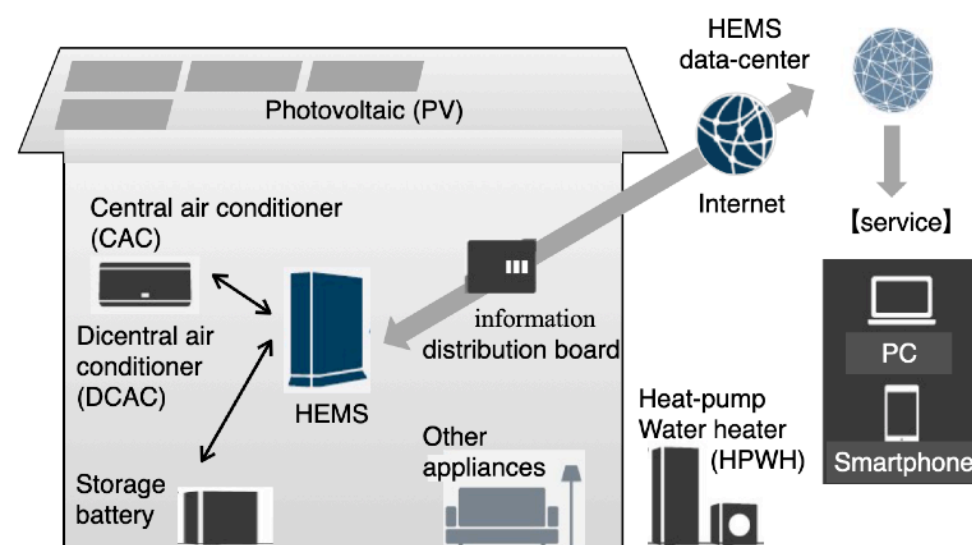


図1.1-6 HEMSシステムと周辺設備の概念図

そのZEHやZEH+の中核システムが、Home Energy Management System(以下：HEMS)である。HEMSは家庭の省エネルギーを促進する事を目的に、エネルギー収支が見える化したり、先進機器と連携し制御を行う。更にサーバーと接続し情報を集積する事で、省エネルギーのコンサルティングや気象警報、気象予測と連動し様々なサービスを展開することができる。（図1.1-6 HEMSシステムと周辺設備の概念図）

住宅のエネルギー消費形態は住宅の断熱気密性能に加え、所有設備・電気機器や建築地域、建築年、居住する世帯構成、季節、時間帯、用途によって様々である。また、太陽光発電システムを代表する創エネルギー、蓄電池や電気自動車などの蓄電エネルギー、ヒートポンプ給湯機など蓄熱システム、など複雑である。この複雑なエネルギー収支形態の見える化が進めば、より効果的、効率的な制度、設計が進み家庭部門のエネルギー削減が進む可能性が高い。

1.2 研究の意義と新規性

前述の通り、社会全体でのCO₂削減には、家庭部門での再エネ活用、省エネルギー化や調整能力の向上が必要不可欠である。その場合、新築既築問わず、自家消費を拡大し自給率が高い住宅をいかに早く普及させるかが決め手となる。早期普及を実現するためには、

- ①政府の効果的な政策
- ②投資対効果が高い住宅供給側の研究開発及び販売政策
- ③住宅購入検討者から見た魅力の向上

が必要であり、この「三方よし」を達成するためには住宅のエネルギー消費構造の現状把握や分析が基盤となる。しかし、太陽光発電の余剰電力活用に代表されるエネルギー構造は、居住エリア、世帯構成、ライフスタイル、気象条件、建築条件や住宅性能、設備性能や容量、制御方法、料金体系により大きく異なり複雑である。第2章で詳述する既往研究は最大数百の実測データやアンケートを基にしたシミュレーションが比較的多い。

そこで、本研究チームは2011年より積水化学工業株式会社 住宅カンパニー協力のもと、そこで供給されている主に、全電化住宅で太陽光発電を搭載した住宅を中心にHEMSの導入と普及、データの蓄積とサービス、更にエネルギー利用実態の分析を進めており、2020年10月現在で沖縄を除く全国、約5万5千世帯へHEMSデータを活用した省エネコンサルティングサービスを継続中である。このサービスはマイページでログインすると自分のエネルギー、光熱費だけではなく電力量の比較やコンサルティングが受けられるサービスであり、毎年5～8千世帯増加している。また、データを活用し新規開発にも取り組んでおり、2017年は過去データを分析してHEMS制御を開発した。

本研究の新規性は、この大量にあるHEMSデータを体系的に解析し、情報を先導的に開示、共有化することである。この解析と開示及び共有化によって、この研究は上記①～③に少しでも役立てて頂き、住宅の省エネルギー化への課題把握とその解決の検討、自家消費を高めるための条件の明確化、及びデータ活用のビジネスアイデア創出と最終的には環境負荷の少ない住宅の早期普及により家庭部門のCO₂削減に資することを目的としている。ただし、本研究のHEMSデータが日本全体の住宅事情を反映し一般化できるわけではないと考える。しかしながら今回、日本全国の新築住宅の中で一定の割合を占める住宅について考察しており、他住宅メーカーも同様の傾向にあると推定される。また、後述する家電機器効率の上昇などはかなり一般化でき、後半の太陽光発電と蓄電池、給湯器の議論も一般化できる可能性は高い。

1.3 研究概要

HEMSシステムは、各設備機器や家電のエネルギー情報を取得しているだけでなく、建物や居住者の基本データとも紐付いている。そのため、下記の通り、様々な角度や切り口で実態把握、分析、研究が可能となっている。

- 1) 居住エリア、家族人数、家族構成、世代など人に属する情報と分析
- 2) 建築年、床面積、断熱性能、建物形態など建物に関する情報と分析
- 3) 所有設備機器、性能、容量など設備機器自体の情報と特性
- 4) 所有設備機器の設定情報、電力契約形態などの情報
- 5) 所有及び使用設備機器、家電などの電力収支情報と分析
(電力収支情報は時間別、日別、月別などに集計が可能)

上記のように1)～4)は静的データ。5)は動的データと分類する。この動的データ+静的データを組み合わせることにより、建築年やエリア毎にどのような家族形態で、どのような住宅性能を有しているか、どのような電力収支をしているか、という事を体系的に分析していく。この見える化によって、さらなる省エネルギーの検討を進めることが可能となる。また、省エネルギーに加えて電力の自家消費や自給率が重要となるため、太陽光発電や蓄電池を含む収支実態を分析し自給率達成条件を試算モデル化していく。

1.4 論文構成

本論文は、本章を含めた全9章で構成される。以下に各章の概要を示す。

第1章「序論」では、家庭部門や戸建て住宅における環境・エネルギー分野の課題と展望、スマートハウスやHEMS技術の置かれている状況を解説し、データ活用の考えと本研究論文の目的を明らかにしている。

第2章「戸建て住宅におけるエネルギー消費分析の既往研究と技術」では、住宅の消費エネルギーに関する既存の研究や方式をまとめ、現状の技術や課題を整理することで、HEMSデータによる分析の新規性や独自性、並びに本研究の位置づけについて述べる。

第3章「ホームエネルギーマネジメントシステムの概要」では、提案するシステムのコンセプト、及び詳細を解説し、同時にシステムや大量データの可能性について述べることで、本研究の意義について述べる。

第4章「建築年毎における総消費及び用途別のエネルギー消費分析」では、HEMSデータを整理し、二世帯、単世帯、夫婦など家族構成別に、建築された年毎の総消費エネルギーの分析を行う。更に冷暖房、給湯、家電照明の用途別に分類し、建築年毎の消費電力分析、検証結果を述べる。

第5章「建築年毎における換気及び家電機器別エネルギー消費分析」では、4章で分析した家電照明用途のエネルギー消費を更に掘り下げる。14種の家電や用途に分類し、同じく建築年毎に整理分析を行う。

第6章「太陽光発電と蓄電池を含む消費実態と収支試算」では、太陽光発電と蓄電池の採用実態を把握、更に各容量(カテゴリー)毎に発電量や充電、放電、自家消費量、売電、買電量などエネルギー収支の分析と検証結果について述べる。

第7章「太陽光発電と蓄電池及びヒートポンプ式給湯機の消費実態と収支試算」では、太陽光発電と蓄電池に加えて、ヒートポンプ式給湯機のエネルギー消費実態を把握。更にカテゴリー別に蓄電池やヒートポンプ式給湯機が太陽光発電の余剰電力を活用した場合の自給率等の試算と分析を行う。

第8章「HEMSデータを活用した自給自足率モデルと必要条件」では、必要な自給率を達成するための太陽光発電と蓄電池の必要条件や容量をモデル化、更に7章の分析結果より、ヒートポンプ式給湯器も含む自給率達成のための条件をモデル化し結果を述べる。

第9章「結論と今後の課題」では、本論文のまとめを述べる。

以上をまとめて、本論文のフローチャートを図1.4-1に示す。

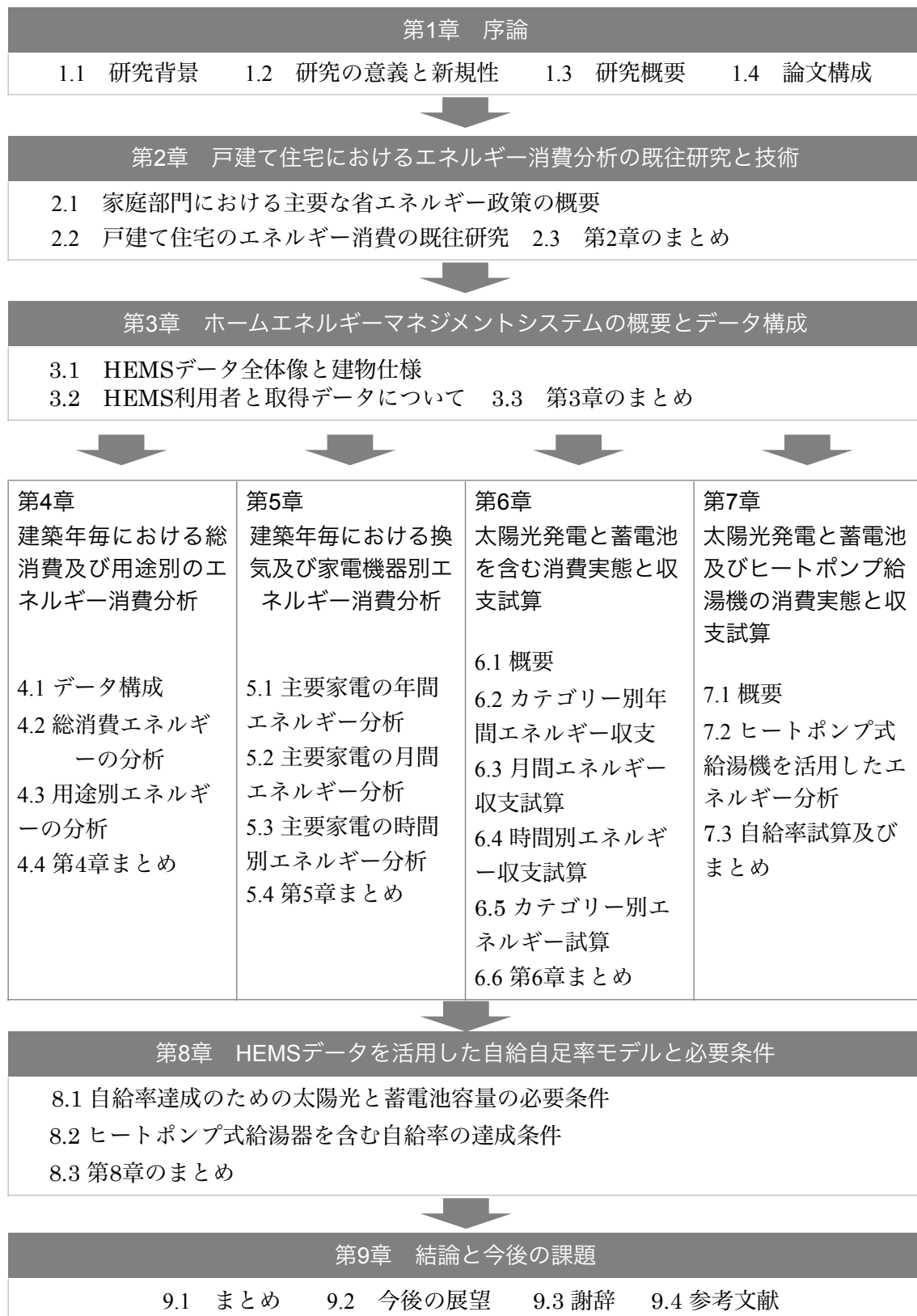


図1.4-1 本論文のフローチャート

第2章 戸建て住宅におけるエネルギー消費分析の既往研究と技術

- 2.1 家庭部門における主要な省エネルギー政策の概要
- 2.2 戸建て住宅のエネルギー消費の既往研究
- 2.3 第2章のまとめ

2.1 家庭部門における主要な省エネルギー政策の概要

研究背景(1.1)で前述した通り、家庭部門におけるエネルギー消費は日本国内全体のエネルギー消費の増加を牽引してきた。一方で、家庭のエネルギー消費を削減しようとする様々な省エネルギー化への「取り組み」や「政策」が行われてきた。代表的な例を以下に示す。

1) トップランナー制度

自動車や家電等のエネルギー消費機器や、断熱材や複層ガラス、サッシといった建材の高効率化・高性能化を製造事業者や輸入事業者に対して促す制度として当初見込み以上の効率改善を達成している。さらなる個別機器の効率向上を図るため、2019年4月には、高効率照明の普及の促進に向け、照明器具及び電球の対象範囲を拡大する新たな基準を策定した。また、テレビ、エアコン、電気温水機器、ガス・石油温水機器等の基準についても各ワーキンググループにおいて審議を行っています。なお、トップランナー制度の対象機器は、2020年4月時点で、32品目（うち3品目は建材）となっています。

2) 省エネ機器に関する情報提供

家電製品やガス石油機器等について、省エネ機器のさらなる普及を促進すべく、小売事業者表示制度（省エネルギーラベル及び統一省エネルギーラベル）を活用し、消費者に対して省エネ情報の提供を行う。家電製品や機器のデータの整理を行うとともに、小売事業者等が容易に各機器のラベルを表示・印刷できるようウェブサイトも運営。

3) 家庭部門における省エネを促進するための情報提供事業

省エネへの理解や関心度を高めることによって省エネ行動を促し、家庭部門における省エネを促進することを目的として、一般消費者に向けて省エネに関する客観的な情報や省エネ対策の先進事例等に関する情報提供。具体的には、冬季における省エネの呼びかけ、省エネ関連のイベント・展示会・メディア等を活用した省エネ施策の紹介や省エネ機器・省エネ支援サービスの周知、住宅の省エネに関する情報提供。

4) ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）、ビル(ZEB)政策

大幅な省エネを実現した上で、太陽光発電等の再生可能エネルギーにより年間で消費する一次エネルギー量を正味でゼロとすることを目指した建築物及び住宅。省エネと快適性を両立させるとともに、業務・家庭部門におけるエネルギー消費の抜本的改善に資するものと期待されており、大手住宅メーカーを中心として普及を推進中である。

5) 住宅性能表示制度等の効果的運用【制度】

住宅の性能について消費者等の選択を支援するため、「住宅の品質確保の促進等に関する法律（平成11年法律第81号）」に基づき、省エネ性能を含む住宅の性能を分かりやすく表示する「住宅性能表示制度」の普及に加え、建築物を室内等の環境品質・性能の向上と省エネ等の環境負荷の低減という両面から総合的に評価し、分かりやすく表示するシステムである建築環境総合性能評価システム（CASBEE）の開発及びその普及を推進。また、建築物省エネ法における誘導措置（2016年4月施行）として、省エネ性能の優れた建築物の認定制度及び省エネ基準適合認定マーク、省エネ性能表示のガイドラインに従った「建築

物省エネルギー性能表示制度（BELS： Building-Housing Energy-efficiency Labeling System）」の普及促進を図る。

6)住宅・建築物の省エネ基準への適合の確保

住宅・建築物の省エネ性能の一層の向上を図るため、建築物の規模・用途ごとの特性に応じた実効性の高い対策として、省エネ基準への適合義務の対象となる建築物の範囲を中規模建築物に拡大することや住宅トップランナー制度の対象に注文戸建住宅及び賃貸アパートを追加することなどを内容とする「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律の一部を改正する法律（令和元年法律第4号）」が、2019年5月に公布され、その一部が同年11月に施行。

7)ナッジ等を活用した家庭等の自発的対策推進事業

行動科学の理論に基づくアプローチ（ナッジ（nudge：そっと後押しする）等）により、国民一人ひとりの行動変容を情報発信等を通じて直接促進し、ライフスタイルの自発的な変革・イノベーションを創出する、費用対効果が高く、対象者にとって自由度のある新たな政策手法を検証。具体的には、家庭部門、運輸部門等を対象に、エネルギー消費やCO₂排出実態に関するデータを収集、解析し、ナッジやブースト等の行動インサイトとAI/IoT等の先端技術を組合せたBI-Techにより、一人ひとりにパーソナライズされたメッセージをフィードバックし、低炭素型の行動変容を促。そして、家庭部門については、行動科学の知見に基づく省エネアドバイス等を記載したレポートを一般世帯に送付して、その後の電気やガスの使用量にどのような効果が表れるかを検証した結果、紙媒体のレポートの送付開始後1年間で、地域毎に1%から2%強の省エネ・省CO₂効果が統計的に有意に確認され。また、スマートフォンのアプリケーションを通じて使用量の見える化をしたり、使用量の変化に関するアラートメッセージを送ったりする等により、3%強の省エネ・省CO₂効果が統計的に有意に確認。②日本版ナッジ・ユニット 環境省では、ナッジを含む行動科学の知見に基づく取組が早期に社会実装され、自立的に普及することを目標に、2017年4月より環境省のイニシアチブの下、産学政官民連携による日本版ナッジ・ユニット「BEST」を発足。2017年度から計15回開催し、行動科学に関する環境省及び地方公共団体の取組やエビデンス（科学的根拠）に基づく政策立案（Evidence-based policymaking, EBPM）、様々な分野の社会課題の解決に行動科学の知見を用いた取組等について議論しています。

上記1)-7)以外にも様々な省エネルギーに対する取り組みが産学官で行われ、現在も促進、推進されている。今回、上記のような取り組みを、より正確に、効果的に行うためにも、消費の実態をエリア、居住者、建築年、建築仕様など様々な角度から体系的にまとめ見える化を進めていくことにする。

2.2 戸建て住宅のエネルギー消費の既往研究

住宅のエネルギー消費の把握に関しては、従来より多くの研究が行われている。主な先行研究として石田⁴⁾らが、全国1000戸程度のアンケートを実施し地域毎に用途別のエネルギー消費の実態を報告している。また村上^{5),6)}らは全国80戸で2002～03年の1年間を調査対象として各種家電機器の年間エネルギー消費について詳細に分析している。さらに井上^{7),8)}らは全国規模のアンケートを実施し建築年別の年間エネルギー消費分析を行い、建築年が近年になるほど省エネが進んでいる事を報告している。これらの研究は、住宅におけるエネルギー消費の把握が主な目的であり、調査方法もアンケートが中心で計測も長期に渡るものではない。

一方、HEMSデータを利用した研究では、清家⁹⁾らが全国600戸を対象として年間のエネルギー消費量の報告と利用頻度などを研究報告している。また、国主導の取り組みとして2015年度に「大規模HEMS情報基盤整備事業」を実施し全国1万4千世帯にHEMSを設置している。(2016年度に事業自体は終了したがデータは一般公開されていない)しかしながら、「全国規模で詳細(時間別、機器別等)」並びに「幅広い建築年数(築30年～1年)」のデータを集積しその影響について検討した事例は少ない。

また、住宅の各家電にまで踏み込んだエネルギー消費に関する先行研究としては、本田¹⁰⁾はHEMSデータを用いて全館空調と断熱性能のエネルギー消費量の関係を分析している。小林¹¹⁾はHEMS情報を活用してエコキュートの運転制御方法の分析を行っている。更に遠藤¹²⁾はHEMSを搭載する住宅の省エネ行動に関する研究を行なっている。中島¹³⁾も家庭内のコミュニケーションと省エネの分析を行っている。これらの研究はHEMSを活用した一部機器の省エネ化や省エネ行動の研究が多い。

更に、住宅のPVや蓄電池のエネルギー収支に関する先行研究は、山口ら¹⁴⁾がPVの発電量シミュレーションより、蓄電池を組み合わせた場合のメリットの研究を行なっている。PVと蓄電池の最適な容量の組み合わせを明らかにし、採算性や経済性を算出することにより実用化の可能性を見出している。また、西野¹⁵⁾はPVと住宅の需要負荷パターン作成し余剰電力の蓄電池利用シミュレーションから経済メリットの研究を行なっている。PVの単価、蓄電池の容量、電気料金単価と制度などによってメリットは大きく変わることを明らかにしている。村上、長野ら^{16),17)}はPV、蓄電池、ヒートポンプ給湯機などを組み合わせたエネルギー需給システムの運用評価を独自のフローでシミュレーションを行なっている。売電価格や料金体系によって蓄電池の制御方法が変わるため、自家消費率に大きく影響することを明らかにしている。遠藤ら¹⁸⁾はPVと蓄電池の組み合わせによる実証実験(N=1)で防災時の適用について検討を行なった。蓄電池を組み合わせることにより買電量を1/3に抑えることができ、災害時にも蓄電池が有効であるということを明らかにしている。Pradita Octoviandiningrum Hadi¹⁹⁾らはPVと蓄電池システムの最適なサイジング法をシミュレーションによって、自給率と自家消費率の観点から分析している。PVの大型化による自給率の上昇や飽和点、自家消費率の低下傾向を明らかにしている。Filomeno M.Vieira²⁰⁾はヨーロッパの典型的な住宅数世帯の実データを用いてモデル化しエネルギー収支のシミュレーションを行っている。PVと蓄電池を利用して自給率を高め、消費電力や買電力の削減率

を求めている。費用対効果も分析し、まだ十分に成立していないことを明らかにしている。Rasmus Luthander²¹⁾は住宅の自家消費の重要性を唱え、エネルギー貯蔵と需要側管理の観点で調査をまとめている。蓄電池容量の最適化と需要管理によって自給率は10～24%増加するとまとめている。

本報では数万規模と数年にわたるHEMSのビッグデータを用途別から更に踏み込み各家電機器の消費実態まで把握、分析し省エネルギー化(以下省エネ)やエネルギー削減の実態と課題を明確にする

2.3 第2章のまとめ

これまでの研究の多くはアンケート、もしくは数世帯から数十世帯を対象とした実測データ、またそのデータを元にしたシミュレーション。また、HEMSデータを活用しても一部機器、一定のエリアを対象としたものが多い。図2-3.1,2-3.2にある通り、家庭でのエネルギー消費は絶対量が増加しているだけではなく、季節による変化、時間帯による増減の増大など「エネルギー消費の変化」が大きくなっている。

本研究では全国約5万世帯と数年という長期間のHEMSデータを活用し、そのエネルギー消費実態を明らかにするとともに建築年、世帯構成、用途、機器、時間や季節がエネルギー消費に及ぼす影響について検討を行う。また、太陽光発電の発電量、家庭用蓄電池の充放電量の実態を把握し自給率や自家消費量、エネルギー収支の試算、分析も行う。

ただし、この研究を進めることで、より需要側の特性(居住エリア、家族構成、建物仕様)に応じたエネルギー収支予測や設備の適正容量を算出提案することが期待できる。今後FIT(固定価格買取制度)価格の低下によって、深夜電力を積極的に利用してきたライフスタイルから、PVの余剰電力活用に変化していき、その時の指標として重要になる『自給率』等を試算することで再生可能エネルギーの活用、系統電力の安定、災害時の安心に繋がる住宅の普及や政策立案に役立てていただく事が重要である。

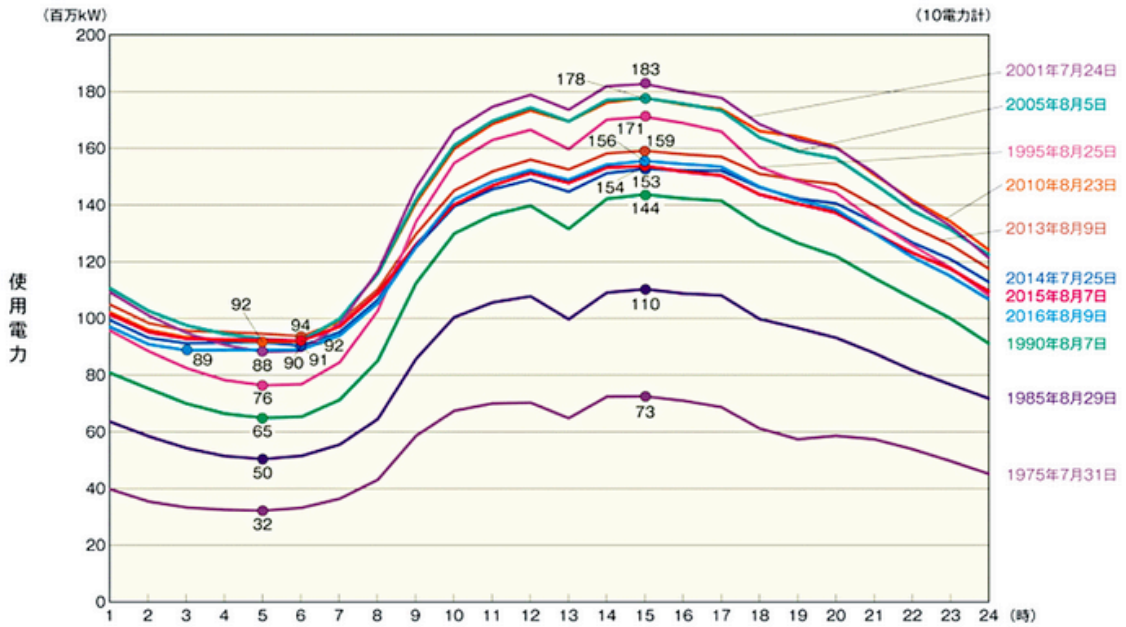


図2-3.1 1975-2015年までの最大電力発生日における1日の電気使用量の推移
 (沖縄電力を除く全電力会社平均)
 (経済産業省 資源エネルギー庁 エネルギー白書 2019)

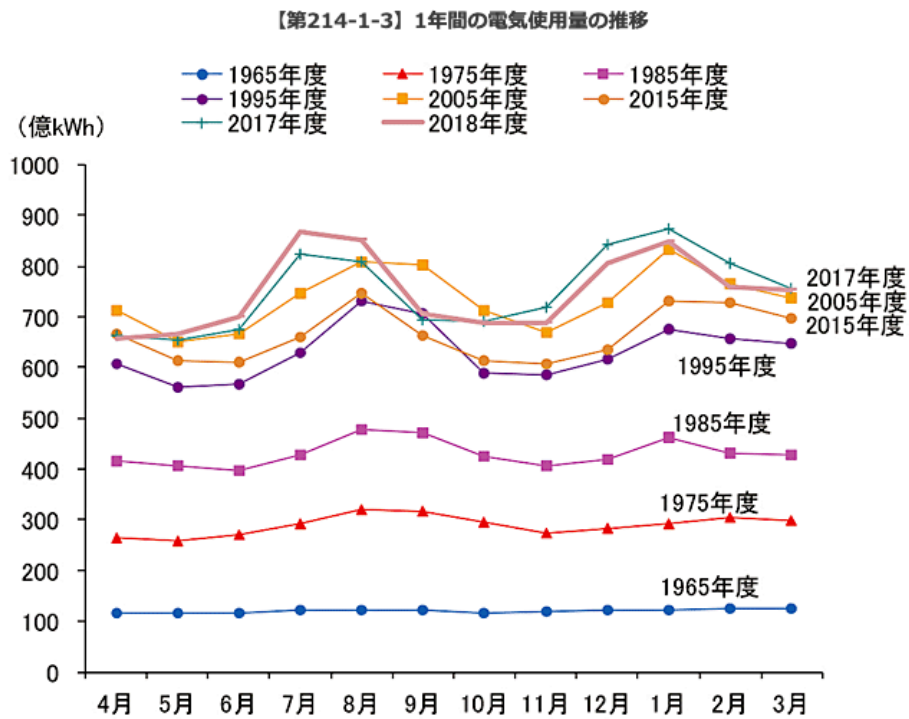


図2-3.2 1965-2015年までの月別電気使用量の推移

第3章 ホームエネルギーマネジメントシステムの概要とデータ構成

- 3.1 HEMSデータ全体像と建物仕様
- 3.2 HEMS利用者と取得データについて
- 3.3 第3章のまとめ

3.1 HEMSデータ全体像と建物仕様

HEMSシステム(図1.1-6)は、情報収集装置(HEMS本体)を中心として、主に情報分電盤から各分岐回路毎の消費電力量や太陽光発電(PhotoVoltaic power generation 以下PV)の発電量情報を取得している。また蓄電池や全室空調(Central Air Conditioner 以下CAC)、個別空調(DisCentral Air Conditioner 以下DCAC)、ヒートポンプ式給湯機(Heat Pump Water Heater 以下HPWH)とはLAN配線で直接接続しており、全てのデータはクラウド上のデータセンターに集積されている。ユーザーはスマートフォン等を利用して、エネルギーの見える化やコンサル、操作制御、見守り等様々なサービスを楽しむことができる。

主な取得データは表3.1-1の通り、静的データとして建築地、建築年、各階床面積、断熱性能、入居者数、家族構成の他に休日、各設備機器の仕様、電力契約コースなどを取得している。動的データとしては、住戸全体と主要設備機器毎のエネルギー消費量、太陽光発電(PV)の発電量、蓄電池の充放電量、売買電量、自家消費量を時間別に取得し、更に日、月、年別に集計し蓄積している。

図3.1-2は建築年別のHEMS登録者数を示している。東日本大震災後に本格導入を進めたため2012年以降の建築が多く、各年で約5000以上の利用者が登録、増加している。更に既建築にも同時に導入を行なったため数は各年200程度と限られてはいるが、古くは1980年代以前に建築された世帯もHEMSを利用している。今回の分析は、2017年度までに入居した約4万における2018年1～12月の1年分のデータを対象とした。対象を省エネルギー基準における地域区分(以下:省エネエリア)別に示したのが表3.1-3で6地域が最も多く2万以上となっている。そのため分析は十分なN数を確保できる一般地域(6地域)から進めていく。

表3.1-4は本研究対象である2011年以降の住宅の主な仕様と設備性能を示している。住宅の断熱性能を示すUA値(外皮平均熱貫流率)は2016年までは平均で0.65(W/m²K)。2017年より屋根と床下および開口部の断熱仕様を強化し0.59となっている。全室空調(CAC)は2015年に高効率化しCOPが3.50から4.00に向上。更に、17年にはHEMSと連携し夜間運転などを気象予測と連動し省エネ制御する機能を搭載した。一種換気システム(Balanced Ventilation)については2014年にモーターを直流(DC)化し省エネ性能の向上を図っている。ヒートポンプ式給湯機(HPWH)は平均APF(Annual Performance Factor:年間平均給湯効率)年々向上し2017年は3.29となっている。照明についてもLED化を進めており2014年まで主たる居室以外、15年以降は居室含めて基本的には全てをLED化している。

表3.1-1 Available HEMS data

静的データ	入居者情報	建築エリア, 入居者人数、家族構成 入居者年代、休日など
	住宅情報	建築タイプ、各階床面積、建築年月 建築方位、使用建材、断熱性能など
	付帯設備情報	冷暖房機器、給湯器器情報、太陽光発電機器、 蓄電池設備情報、VtoHシステム情報 換気システム情報
動的データ	エネルギー消費量 (年、月、日、時間別)	総消費エネルギー、用途別エネルギー消費量、 冷暖房消費量、給湯エネルギー消費量、 照明、換気エネルギー消費量、 機器別消費量 (冷蔵庫、IHヒーターなど) 部屋別消費量 (LDK,主寝室、子供部屋など)
	太陽光発電 蓄電池関連 (年、月、日、時間別)	太陽光発電量、自家消費量、売電量、買電量 蓄電池充電量、蓄電池放電量、残量

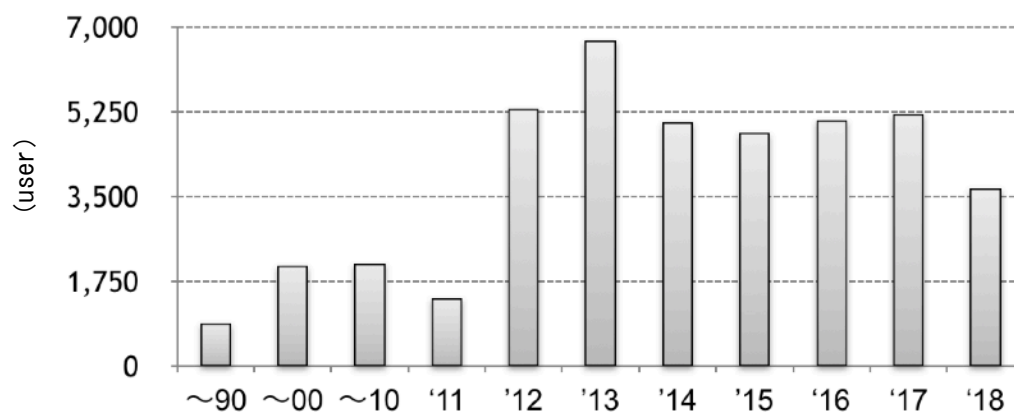


図3.1-2 HEMS users by construction year

表3.1-3 HEMS users by energy conservation level Zone

(Zone)	1	2	3	4	5	6	7
(users)	340	580	740	3400	11800	24500	1100

表4.1-1 Target of energy analysis

Zone 6	couple	Single family	Two families
Floor space(m ²)	100~130	100~140	120~170
Year of construction	2011~2017		
Extracted data	2018/01~12		
Number of House(total)	1575	6225	1483
2011	51	240	49
2012	224	1040	236
2013	322	1271	323
2014	232	1005	234
2015	258	1011	213
2016	287	987	221
2017	201	674	207

3.2 HEMS利用者と取得データについて

図3.2-1は6地域における建築年毎のヒートポンプ式給湯機（以下HPWH）及び電気温水器(Radiator Water Heater)の採用率を示している。HPWHは2001年から2011年ごろにかけて徐々に採用率が向上しそれ以降はほぼ100%採用されていることがわかる。

図3.2-2は6地域におけるLDK及び主要居室冷暖房の導入推移を示している。2010年から全室空調(CAC)の採用が進んできており、年々採用率が向上している。一方で一般的に用いられている個別空調(DCAC)は年々採用率が低下、近年は30%以下となっている。ただしHPWHのように全室空調が圧倒的な採用率を占めるにまでは至っておらず、一定規模の個別空調(DCAC)採用層が存在する。

図3.2-3は6地域における第1種換気システム(Balanced Ventilation)の採用率と採用数を示している。2010年に第1種換気システムの採用率が50%以上に向上、さらに近年では約80%まで向上している。

本研究対象であるHEMS利用者の延べ床面積比率を図3.2-4に示した。2010-18年に建築した対象は110~130㎡が最も多く40~42%、110㎡以下は21~26%、130㎡以上も32~39%存在している。また近年になるほど平均床面積は小さくなっている。家族人数は図3.2-5で示した通り3人が最も多い。住宅土地統計調査において2013,18年の日本における持ち家の平均床面積は128.63㎡,126.63㎡となっており最近になる程平均床面積は小さくなっている。また家族人数は2.86人となっている。図3.2-6は主な家族構成毎の床面積比率を示している。夫婦+子供の単世帯では110~130㎡がピーク（夫婦のみも同様）になっているのに対して二世帯では140~160㎡になだらかなピークがあり、同時に200㎡以上にもボリュームが存在している。これらの結果を踏まえるとエネルギー分析を行うにあたっては省エネ基準のエリア毎に加えて、建築時期や家族構成によって床面積や住性能、住宅設備仕様が異なるためこれらを変数に加えて分析を進めていく必要がある。

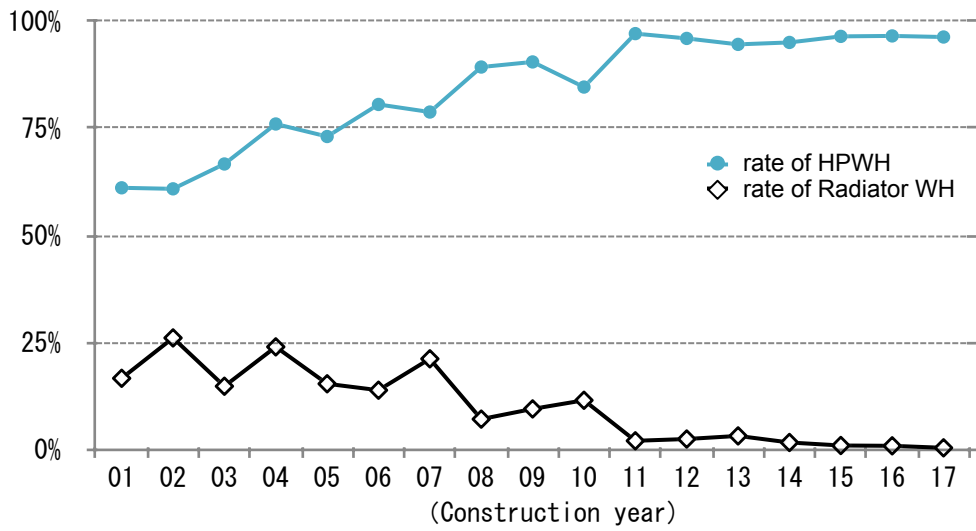


図3.2-1 Adoption rate of Water Heater type

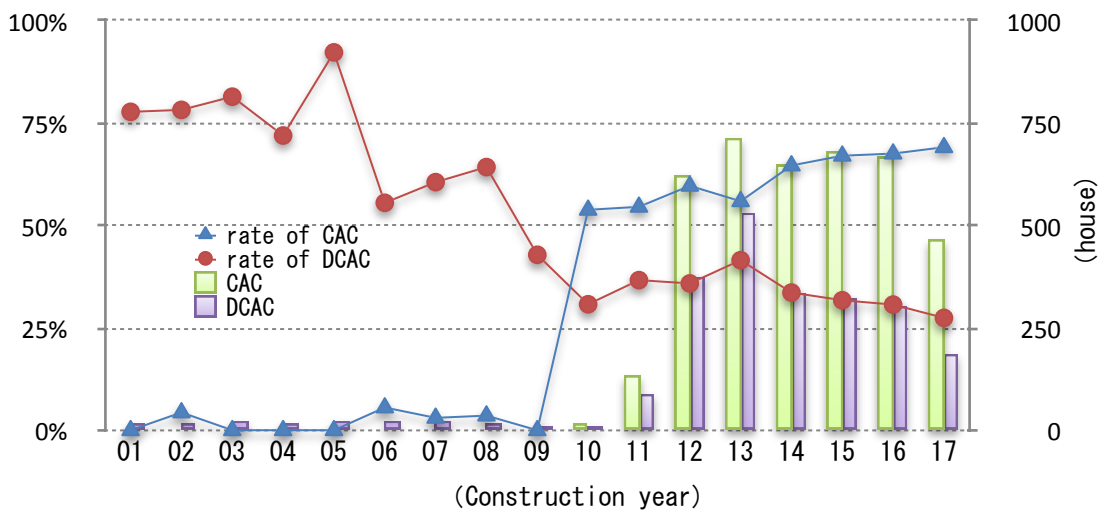


図3.2-2 Adoption rate of each AC by construction year

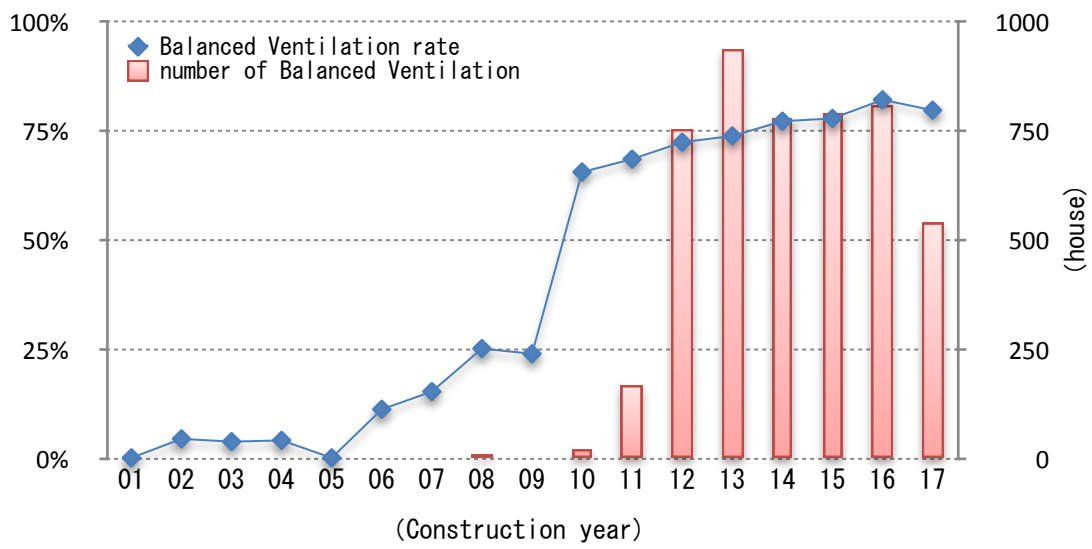


図3.2-3 Annual Balanced Ventilation rate

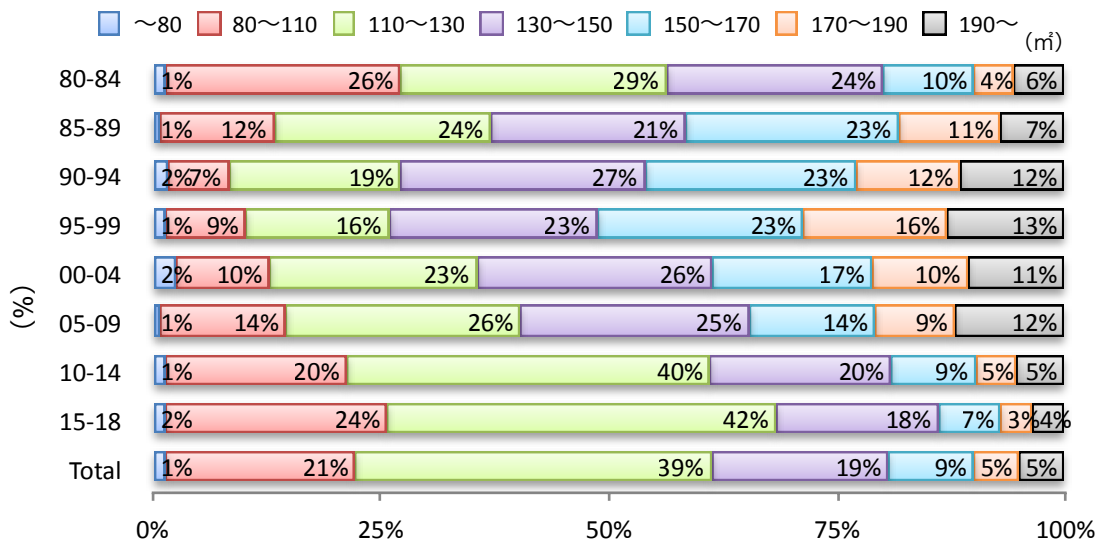


図3.2-4 Floor area ratio by construction year

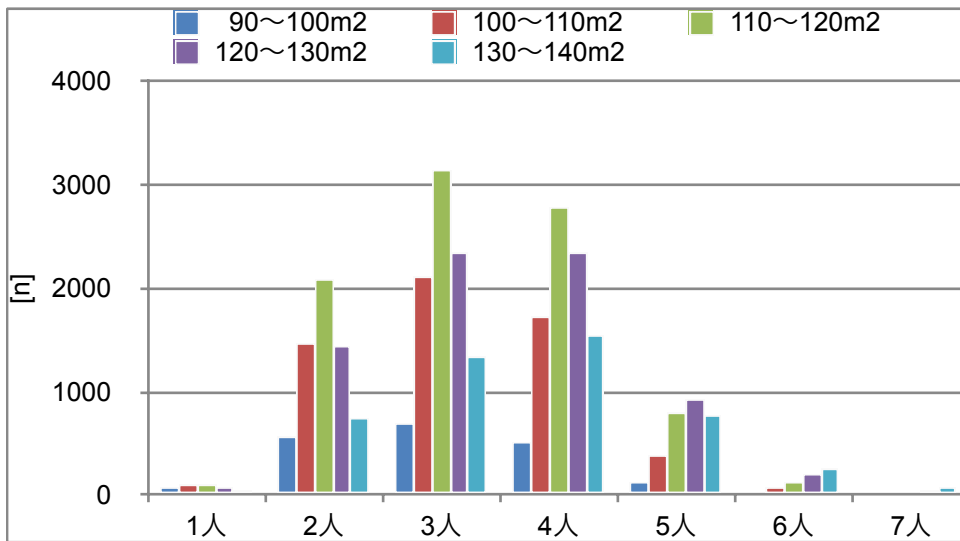


図3.2-5 number of family by floor space

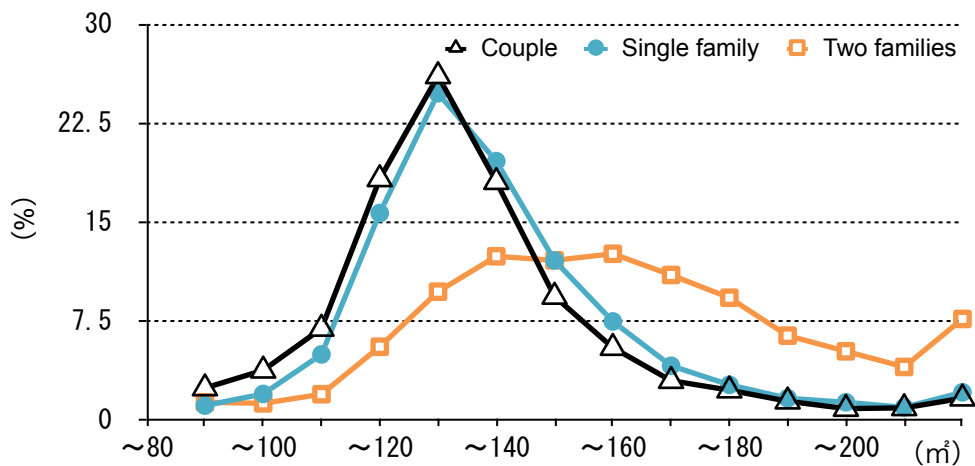


図3.2-6 Floor area ratio by family type

3.3 第3章のまとめ

HEMSで取得している主なデータと建築年、建築エリア毎の主な住宅性能、採用設備、設備性能、床面積、家族構成などの分析を行った。新築住宅とリフォーム時にHEMSを導入したため建築年としては30年の範囲でデータ取得できている。また、エリアとしては北海道から鹿児島まで全国規模となっている。2012年から本格的にデータを取得し始めたため、最も長くデータを取得している世帯で約7年となる。

今後の住宅は「如何に初期投資を少なくし、生活時は太陽光発電の余剰電力を効率的に使うか」が求められる。つまり『顧客にとって投資対効果を最大化し、如何に快適な暮らしを実現しながら環境負荷を最小化するか』ということである。しかしながら、建築のエリア、気候、気象、ライフスタイル、住宅や設備性能などにより大きく変わってくるため、データを体系的に分析することがますます重要となってくる。

第4章

建築年毎における総消費及び用途別のエネルギー消費分析

- 4.1 データ構成
- 4.2 総消費エネルギーの分析
- 4.3 用途別エネルギーの分析
- 4.4 第4章まとめ

4.1 データ構成

表4.1-1は省エネエリア6地域における今回の分析対象を示している。まず、夫婦のみと単世帯（夫婦と子供）、二世帯に分類し建築年は2011年～2017年までとした。エネルギー消費量の分析期間は2018年1～12月の1年間で家族構成毎に建築年別で分析を行った。また、建築年毎に床面積比率が異なる(図3.2-4)ため、床面積の影響を極力受けたくないよう家族構成毎に分析対象の床面積を固定した。家族構成毎の建築年別分析対象N数も表4.1-1に示している。

表4.1-1 Target of energy analysis

Zone 6	couple	Single family	Two families
Floor space(m2)	100～130	100～140	120～170
Year of construction	2011～2017		
Extracted data	2018/01～12		
Number of House(total)	1575	6225	1483
2011	51	240	49
2012	224	1040	236
2013	322	1271	323
2014	232	1005	234
2015	258	1011	213
2016	287	987	221
2017	201	674	207

4.2 総消費エネルギーの分析

図4.2-1は家族構成毎の建築年別年間エネルギー総消費量(総消費量とは純粋に消費使用したエネルギー量であり太陽光発電の自家消費分は控除されていない。売電分についても含まれていない)の中央値と±四分位点(Top75%,Bottom25%)を示している。全ての家族構成で2011年をピークとして減少傾向にある。最も減少率が高いのは夫婦のみで30%ほど減少、単世帯も20%ほど減少している。更に単世帯の代表月(図4.2-2)で見ても共通して2011年前後をピークとして減少傾向にあり、冬期、夏期、中間期も20%ほど減少している。建築年別エネルギー消費量の変化の大きな要因は先行研究⁷⁾からも分かるように、断熱性能の向上や各設備、家電の高効率化などのハード的な要因及び、ライフスタイルや省エネ意識の変化などソフト的な要因も考えられる。その為、本研究では、まずハード面の給湯や冷暖房など用途別の分析を行い、その他家電の詳細分析は次章以降分析を行う。

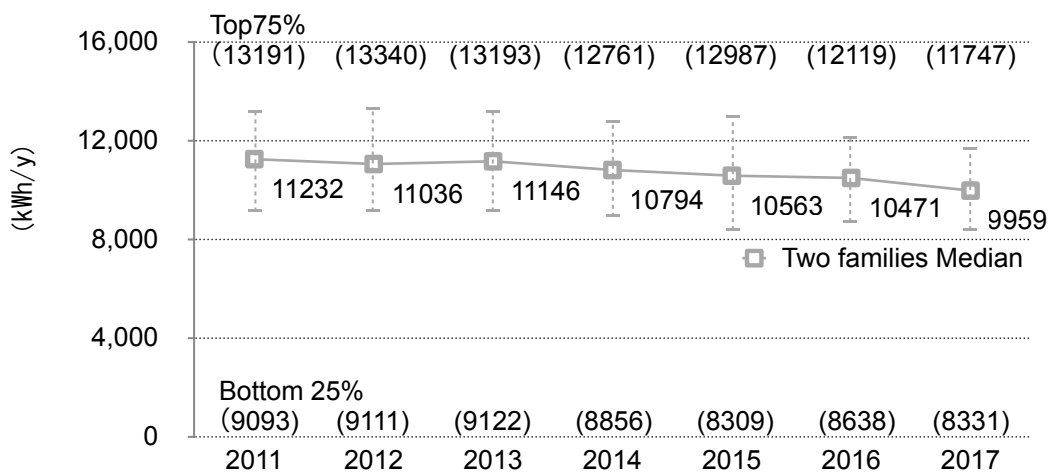
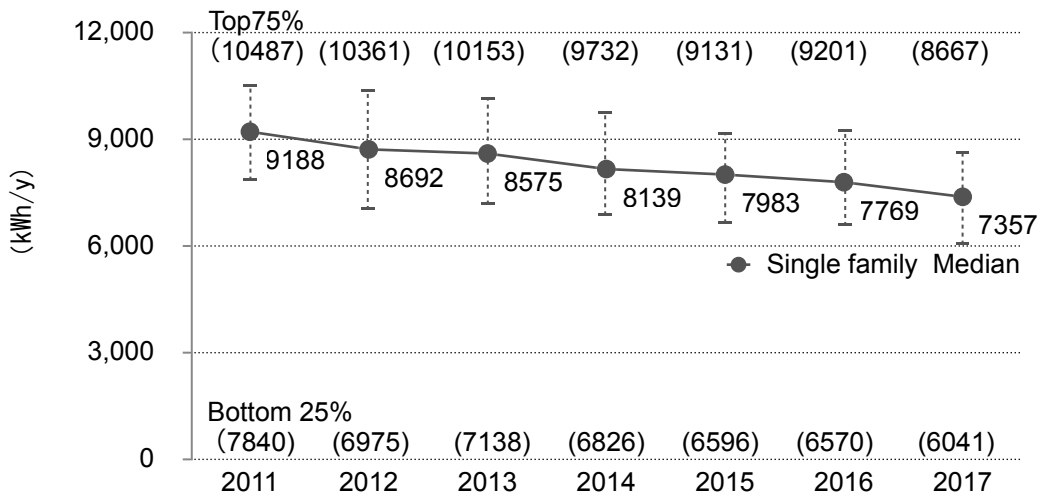
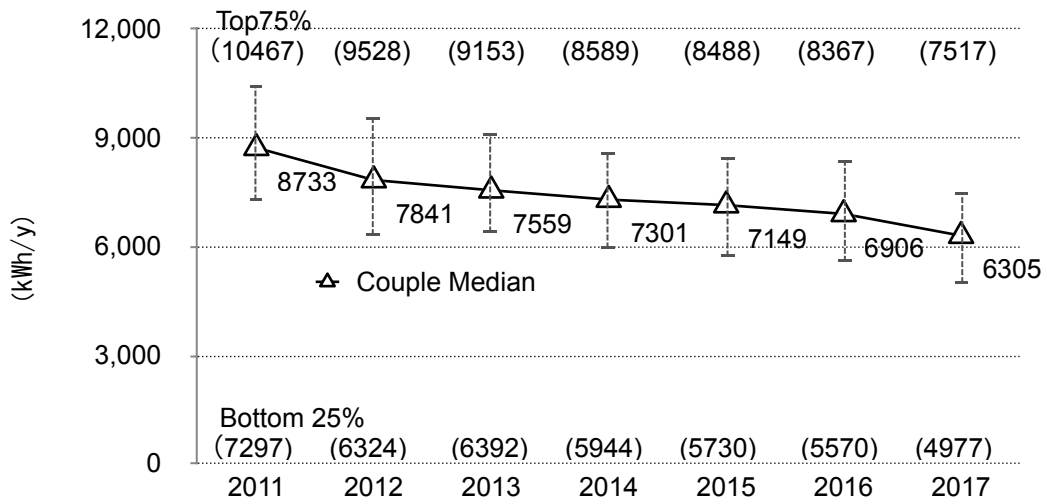


图4.2-1 Annual of Total Power consumption by construction year
(Top) Couple、(Mid) Single family、(Bottom) Two families

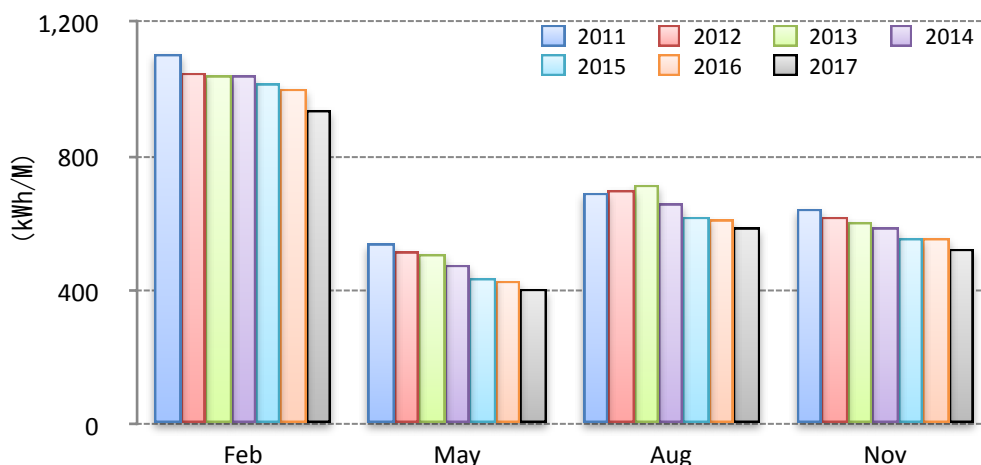


図4.2-2 Representative Monthly of Total Power consumption by construction year (Single family)

4.3 用途別エネルギーの分析

4.3-1 給湯エネルギーの分析

図4.3-1は省エネエリア6地域における2018年の建築年別HPWHの年間消費電力量(中央値と±四分位点)とその年設置されたHPWHの平均APFを示している。2011年建築邸の平均APFは2.98であり、その後も毎年0.1~0.2効率が上昇していることがわかる。2017年建築のHPWH平均APFは3.31まで上昇している。設備機器効率の向上を背景としてHPWHの年間消費電力量は年々減少し、2017年は2011年に比べ約30%減で1188kWh/年となっている。HPWHの高効率化や学習機能向上による制御機能の高度化及び最近では国1.1-5のNet Zero Energy House(以下ZEH)政策によって効率の高い機器の採用率が高まっているためと考えられ、住戸全体の省エネ化にも大きく貢献している。

次に図4.3-2は主要な月のHPWHの消費電力量を示している。冬期、夏期、中間期いずれも建築年が最近になるほど消費電力量は減少している。最も削減率が大きいのは冬季で削減率は約30%となっている。2017年建築邸では8月の消費電力量はわずか35kWh/月で一日1kWh程度となっている。

図4.3-3、-4はそれぞれ2月と8月の建築年毎の時間別消費電力量を示している。建築年が新しくなるほど稼働時間が短縮され尚且つ1時間の消費電力量も減少している。また最近のHPWHになるほど学習機能が発達し、できる限り稼働のピークが朝方になっている。この事によって保温時間が短くなりさらに省エネを促進していると考えられる。

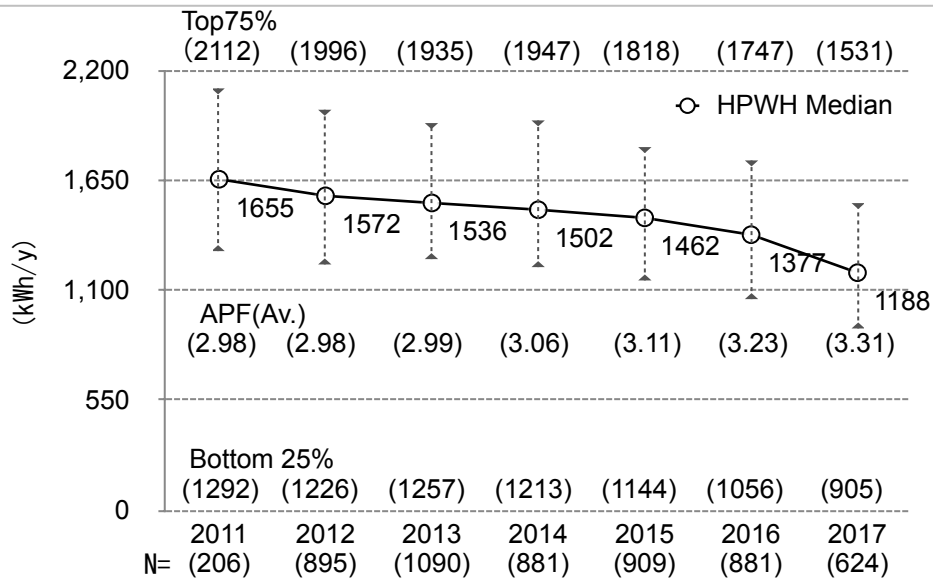


图4.3-1 Annual power consumption for HPWH

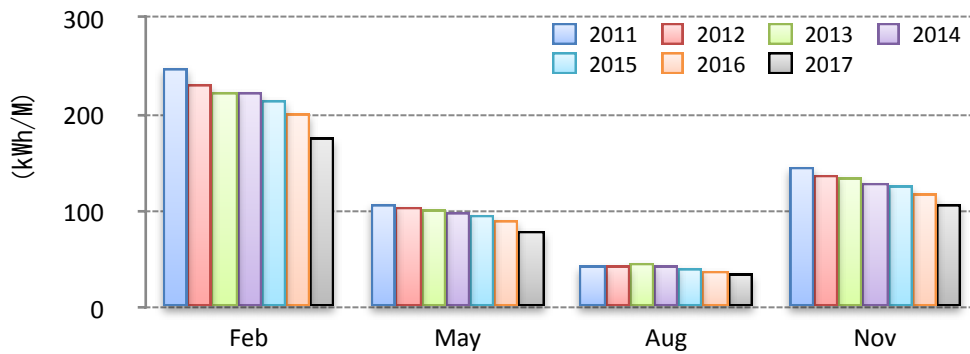


图4.3-2 Representative Monthly of power consumption for HPWH

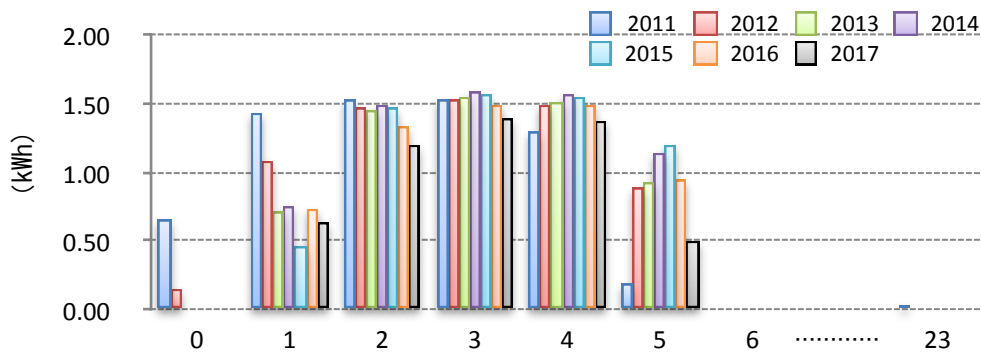


图4.3-3 Hourly of power consumption for HPWH in Feb

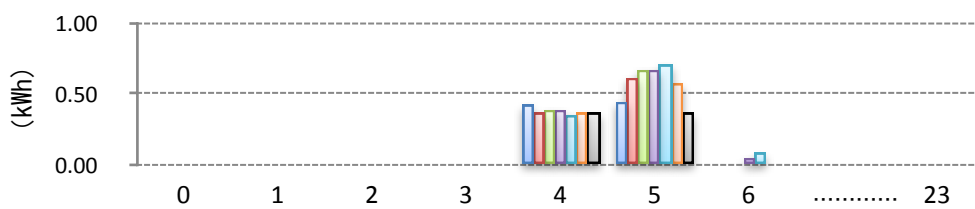


图4.3-4 Hourly of power consumption for HPWH in Aug

4.3-2 冷暖房エネルギーの分析

図4.3-5は全室空調(CAC)と個別空調(DCAC)の建築年別の年間エネルギー消費量、平均断熱性能(UA値)、CAC機器効率を示している。表4.3-6はDCACの平均保有台数と空調対象面積(モデルプランより換算)を表している。表4.1-1で示した通りCACにおいて機器の高効率化を進めてきたが、年間冷暖房エネルギー消費量は2012年より増加傾向にあり、2016年までに約500kWh増加している。ただし2017年は約100kWh減少に転じており、断熱性能UA値が0.06(W/m²K)向上していることも要因の一つと考えられる。DCACの年間消費エネルギーは1300~1500kWh弱でCACの5~6割に留まっており、建築年の違いによって大きな差異は見られない。一方でDCACの所有台数は2011年3.1台から2017年5.1台まで年々増加していることが分かってきた。

図4.3-7はCACの建築年別月間エネルギー消費量、3-8は平均室温、3-9は設定温度を示している。夏期は横ばいか減少傾向なのに対して、冬期と中間期は増加、特に中間期の増加率が顕著であることがわかる。ただし2017年冬期のみ減少している。2017年冬期の設定温度は約0.4~0.7°C低いが、平均室温は約1~2°C高く、UA値が0.59と他の建築年に対して10%ほど断熱性能が向上していることも要因として考えられる。次に、図4.3-10,11で2月、3-12,13で8月の時間別消費電力と平均室温を示している。2017年は2,8月共に消費電力は同等もしくは少なく、室内温度において2月は1~3°C高く、8月は2014,15年よりも低くなっている。CACの機器効率は同一のため断熱性能の違いが要因と考えられる。図4.3-14で過去10年間と測定年2018年の外気温を示したが特段平均と乖離はしていない。CACの時間別消費電力量に関して、2月は深夜から早朝の時間帯は増加傾向、午前中は2015年頃をピークとして減少に転じている。それ以外の12時~23時までは建築年が新しくなるほど減少している。8月においても深夜から早朝は増加傾向、それ以外の時間は横ばいもしくは減少傾向にある。CACをまとめると夏期及び冬期の深夜時間帯、並びに中間期のエネルギー消費量の増加つまり「稼働時間の増加」が全体のエネルギー消費量の増加要因となっていると考えられる。

次に図4.3-15はDCACの月間消費電力量を示しており、2013年をピークとして冬期、夏期は若干減少傾向、中間期は年々消費量が増加傾向にある。図4.3-16,17は2月と8月のDCAC時間別消費電力量を示している。2月はどの時間帯も建築年が最近になるにつれて消費電力が増加し2015年をピークとして減少に転じている。また、8月ではどの時間帯も建築年によって消費電力の大きな変化は見られない。

用途別消費エネルギーの冷暖房をまとめるとエネルギー消費は増加傾向であることが分かった。主な原因として、①全室空調の採用率向上 ②中間期のエネルギー消費量の増加 ③CACの深夜及び早朝における消費電力量の増加が考えられる。ただし今後は2017年で見られたように、機器の高効率化や断熱性能の向上で冷暖房のエネルギー消費量は、削減の方向に向かうことが可能だと考えられる。

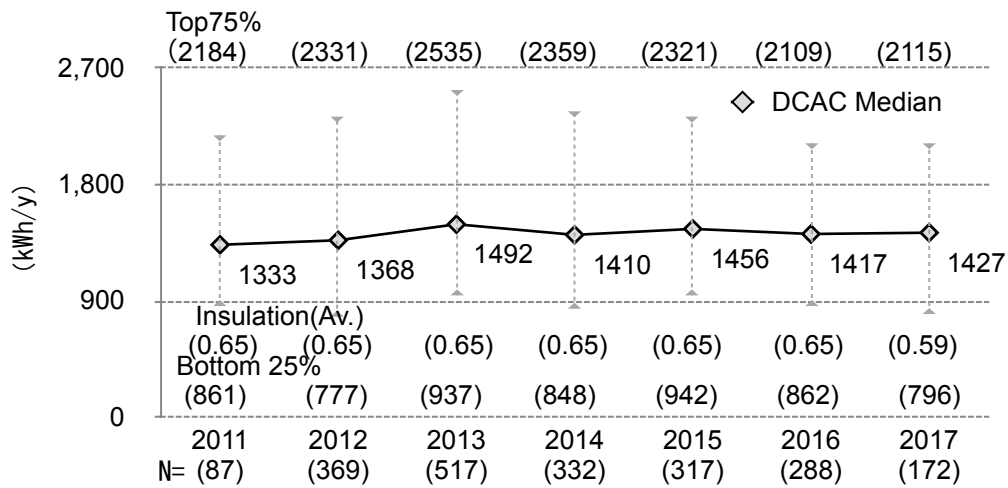
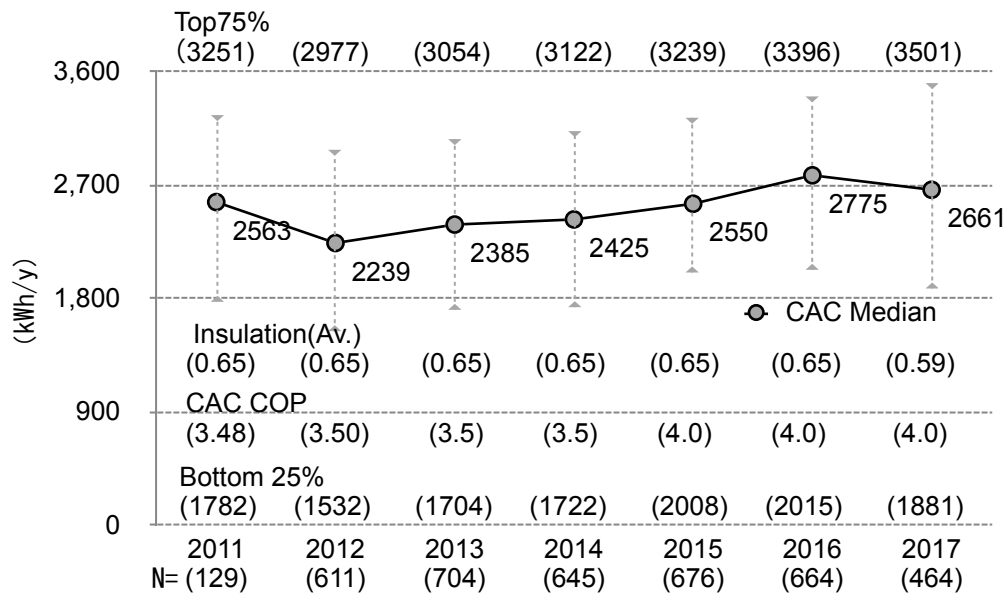


图4.3-5 Annual Power consumption of CAC(Top), DCAC(Bottom)

表4.3-6 Average number and target area of DCAC by construction year

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Av.Number of DCAC	3.4	3.5	3.5	3.7	3.8	4.2	5.1
area(m ²)	42.5	43.8	43.8	46.3	47.5	52.5	63.8

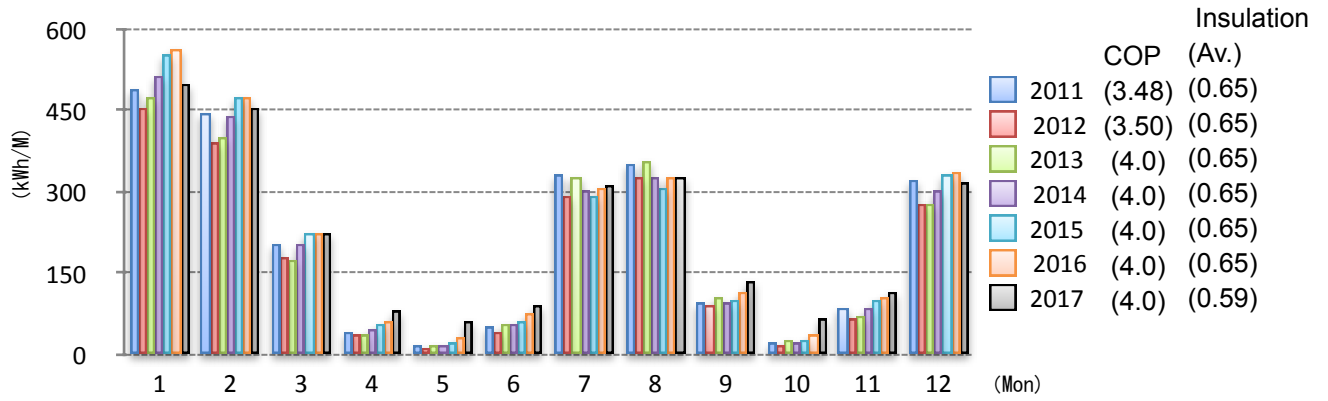


図4.3-7 Monthly power consumption of CAC

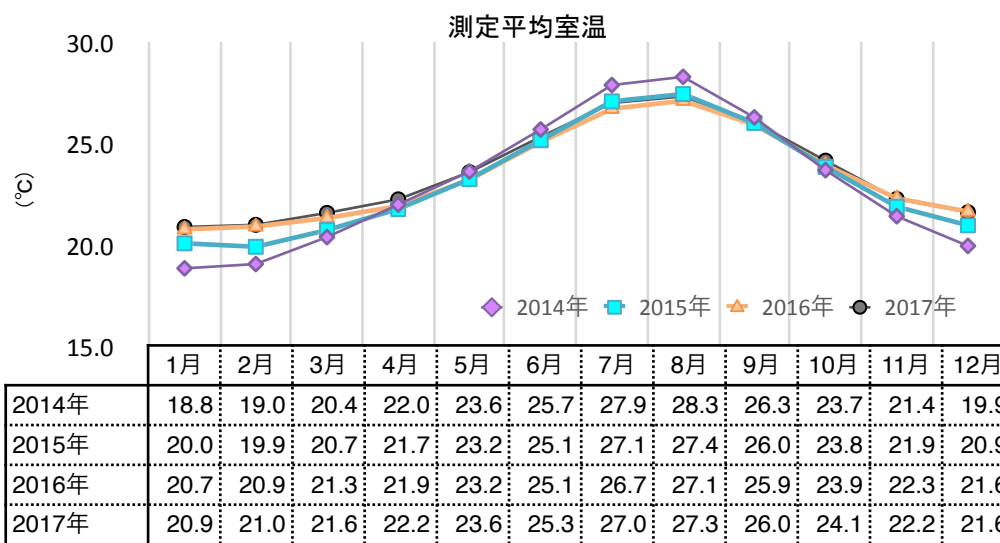


図4.3-8 Monthly average room temperature of CAC

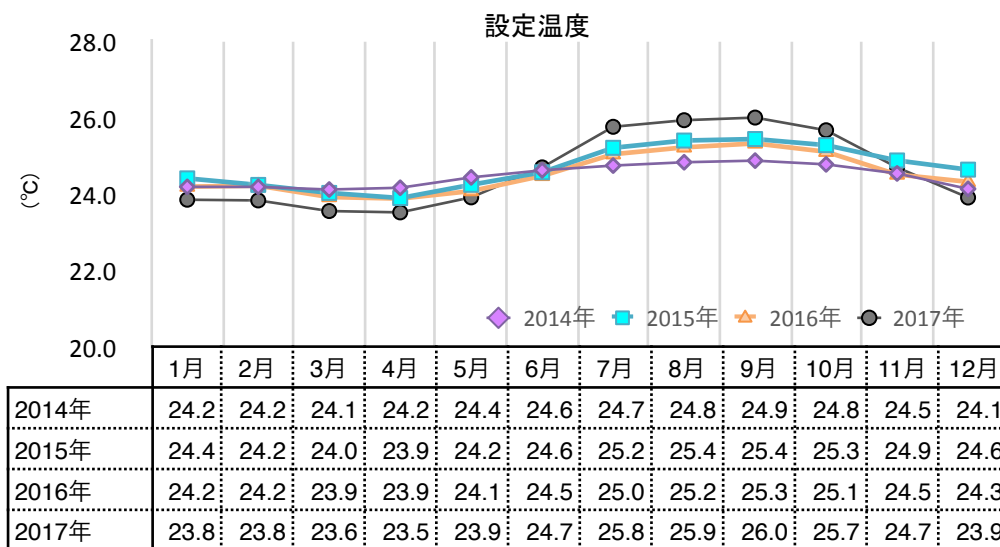


図4.3-9 Monthly preset temperature of CAC

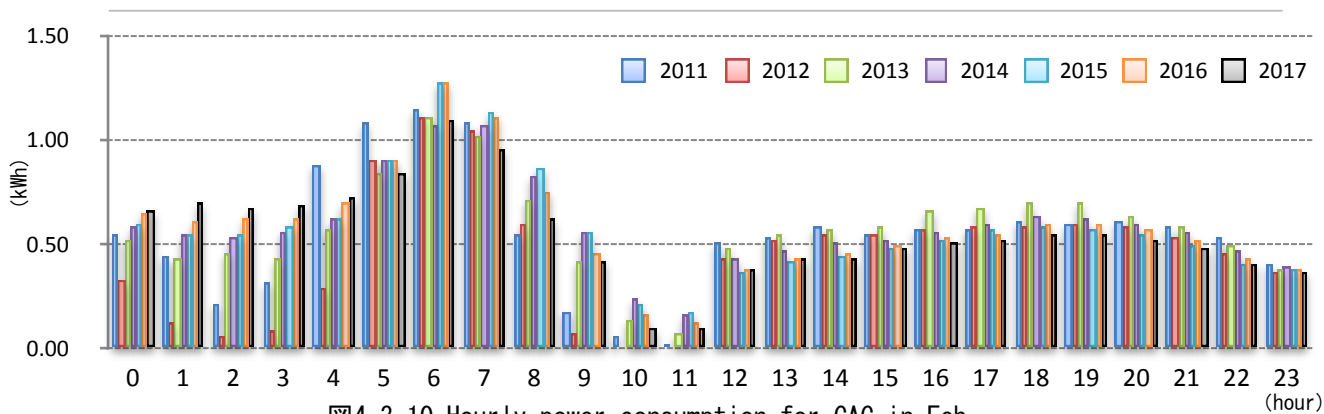
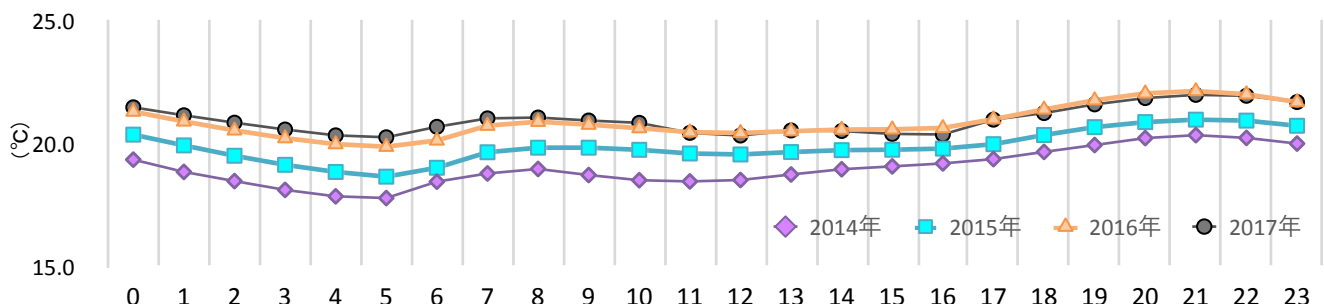


图4.3-10 Hourly power consumption for CAC in Feb



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2014年	19.3	18.8	18.5	18.1	17.9	17.8	18.5	18.8	19.0	18.7	18.5	18.5	18.5	18.7	19.0	19.1	19.2	19.4	19.7	19.9	20.2	20.3	20.2	20.0
2015年	20.4	19.9	19.5	19.1	18.8	18.7	19.0	19.6	19.8	19.8	19.7	19.6	19.6	19.7	19.7	19.8	19.8	20.0	20.3	20.7	20.9	21.0	20.9	20.7
2016年	21.3	20.9	20.5	20.2	20.0	19.9	20.1	20.7	20.9	20.8	20.6	20.5	20.4	20.5	20.6	20.6	20.6	21.0	21.4	21.8	22.0	22.1	22.0	21.7
2017年	21.5	21.2	20.9	20.6	20.3	20.3	20.7	21.0	21.1	20.9	20.8	20.4	20.3	20.5	20.5	20.4	20.4	21.0	21.2	21.6	21.9	22.0	21.9	21.7

图4.3-11 Hourly average room temperature for CAC in Feb

(°C)

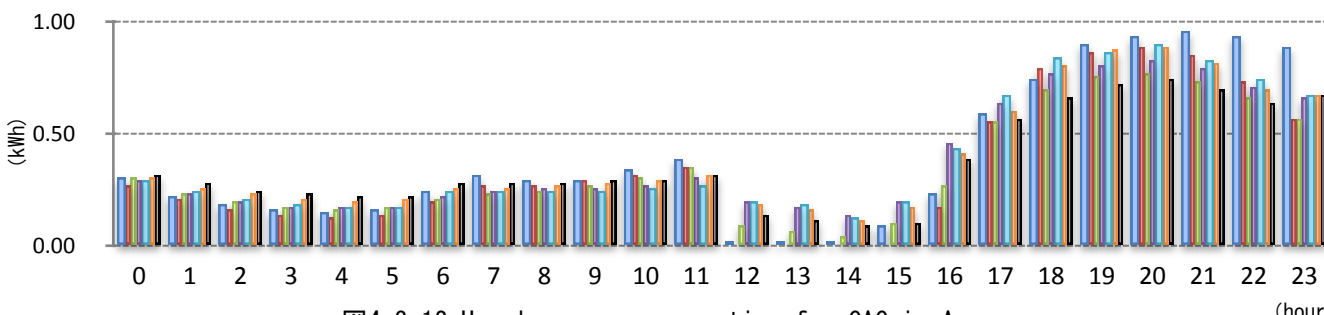
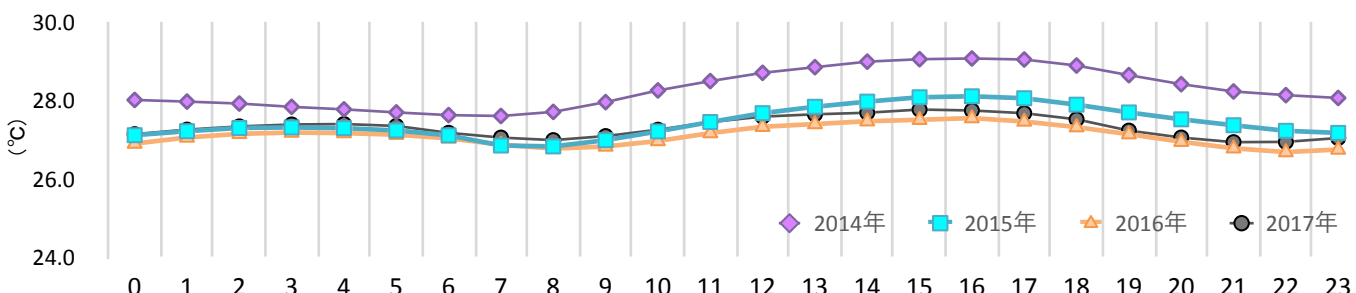


图4.3-12 Hourly power consumption for CAC in Aug

(hour)



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2014年	28.0	28.0	27.9	27.8	27.8	27.7	27.6	27.6	27.7	28.0	28.3	28.5	28.7	28.8	29.0	29.0	29.1	29.0	28.9	28.6	28.4	28.2	28.1	28.1
2015年	27.1	27.2	27.3	27.3	27.3	27.2	27.1	26.8	26.8	27.0	27.2	27.4	27.7	27.8	28.0	28.1	28.1	28.1	27.9	27.7	27.5	27.4	27.2	27.2
2016年	26.9	27.0	27.1	27.2	27.2	27.1	27.0	26.9	26.8	26.8	27.0	27.2	27.3	27.4	27.5	27.5	27.5	27.5	27.3	27.1	26.9	26.8	26.7	26.7
2017年	27.1	27.2	27.3	27.4	27.4	27.3	27.2	27.0	27.0	27.1	27.2	27.4	27.6	27.6	27.7	27.8	27.7	27.7	27.5	27.2	27.0	26.9	26.9	27.0

图4.3-13 Hourly average room temperature for CAC in Aug

(°C)

2018年と過去10年平均の外気温

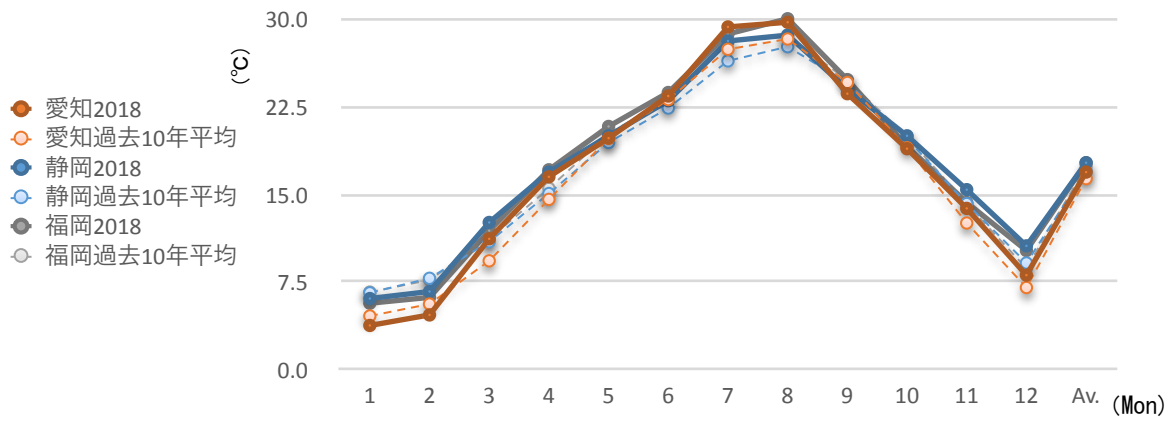


図4.3-14 Average over the last 10 years and 2018 outside temperature

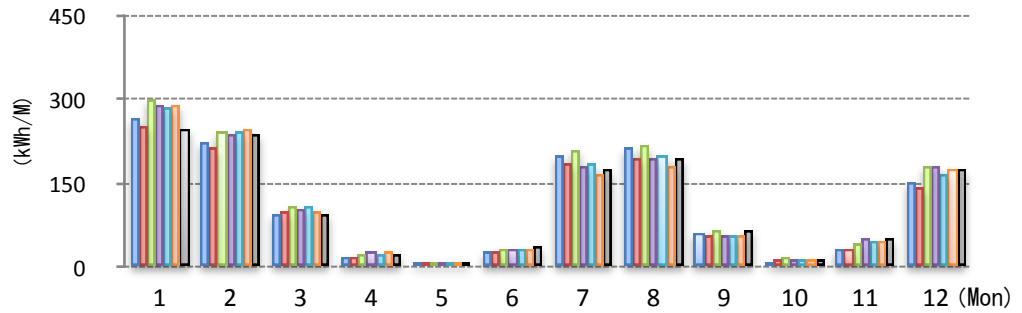


図4.3-15 Monthly power consumption for DCAC

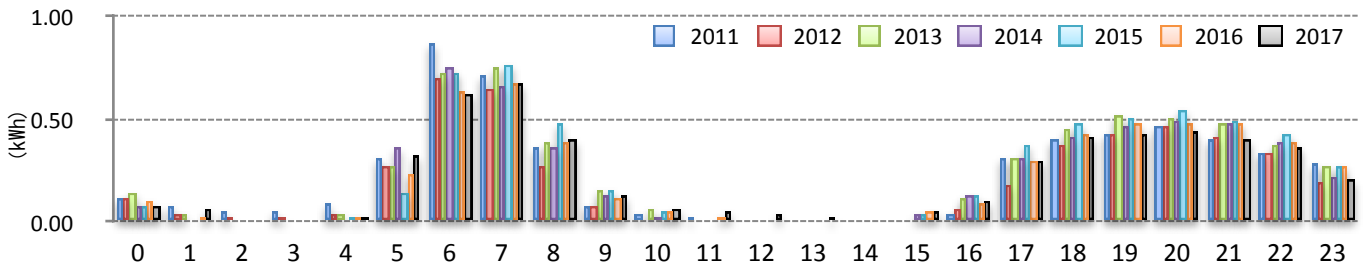


図4.3-16 Hourly power consumption for DCAC in Feb

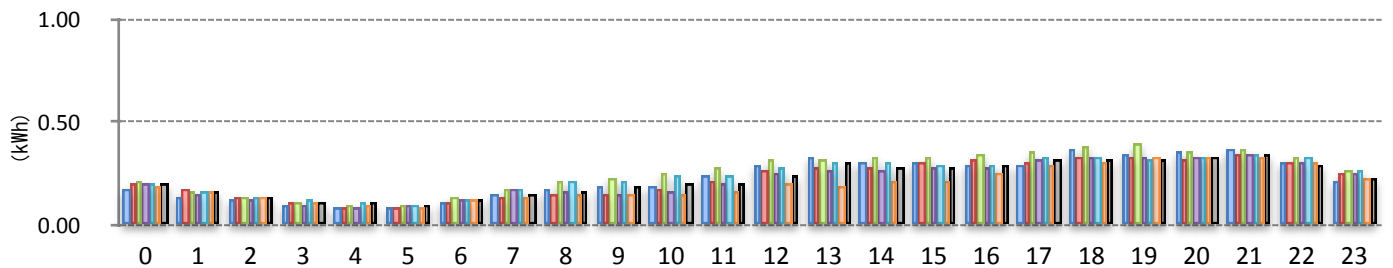


図4.3-17 Hourly power consumption for DCAC in Aug

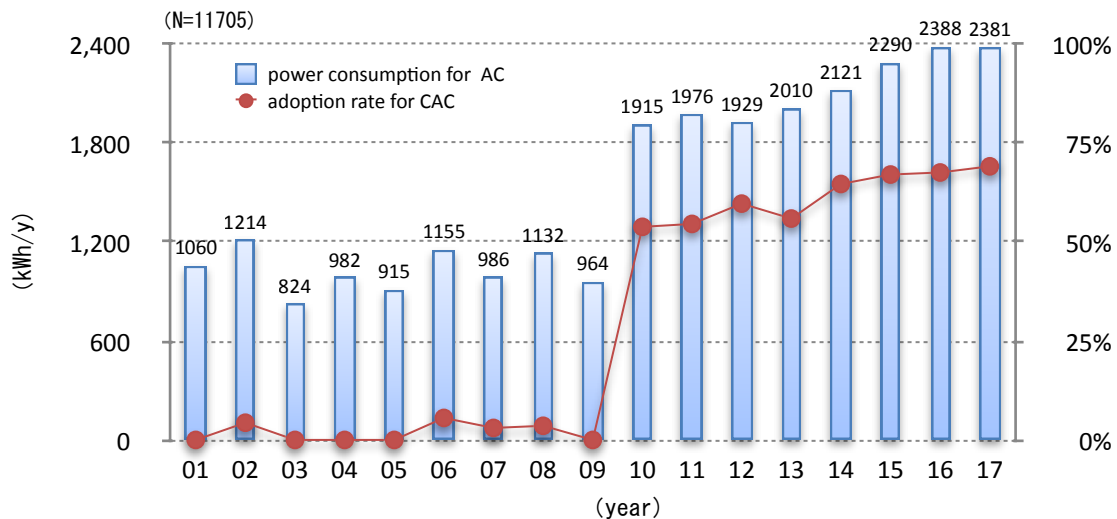


図4.3-18 Annual power consumption and adoption rate for CAC

4-3-3 家電及びその他電力量の分析

図4.3-19は単世帯の6地域における換気システム種別、家電及びその他電力の建築年別年間エネルギー消費量並びに第1種換気システムの採用率を示している。(その他電力とは照明及び換気システムの電力。換気システムに関しては局所換気も含み、局所換気自体の計測がHEMSでは困難であることと、中間期など熱負荷に影響を受けない場合もあるため「その他」の分類に入れている)2010年に第1種換気システムの採用率が50%以上に向上、さらに近年では約80%の採用となっている。換気システムの種類に関わらずここ10年で消費エネルギーは約半減している。要因として前述したトップランナー制度を背景とした各家電の省エネルギー化が考えられるが、この詳細分析は次の章で行う。表3.1-4で示した通り、一種換気システムに関しては2014年に直流(DCモーター化)化し約35%エネルギーを削減、さらに2017年に温度差によって風量を制御するシステムを導入した。結果として2017年は3種換気システムと同等のエネルギー消費量となっている。図4.3-20は建築年別の月間消費量を示している。2017年など近年は月毎の消費量はほぼ同等となっているが2011年など建築年が古くなるほど冬期及び夏期の消費量が大きく季節によって差が生じていることが分かってきた。この原因として前述した全室空調の採用率が低いため電気ストーブやホットカーペットなどの副冷暖房機器が使われていることや照明の消費電力量などが原因と推測されるが、さらに詳細な分析が必要と考えられる。

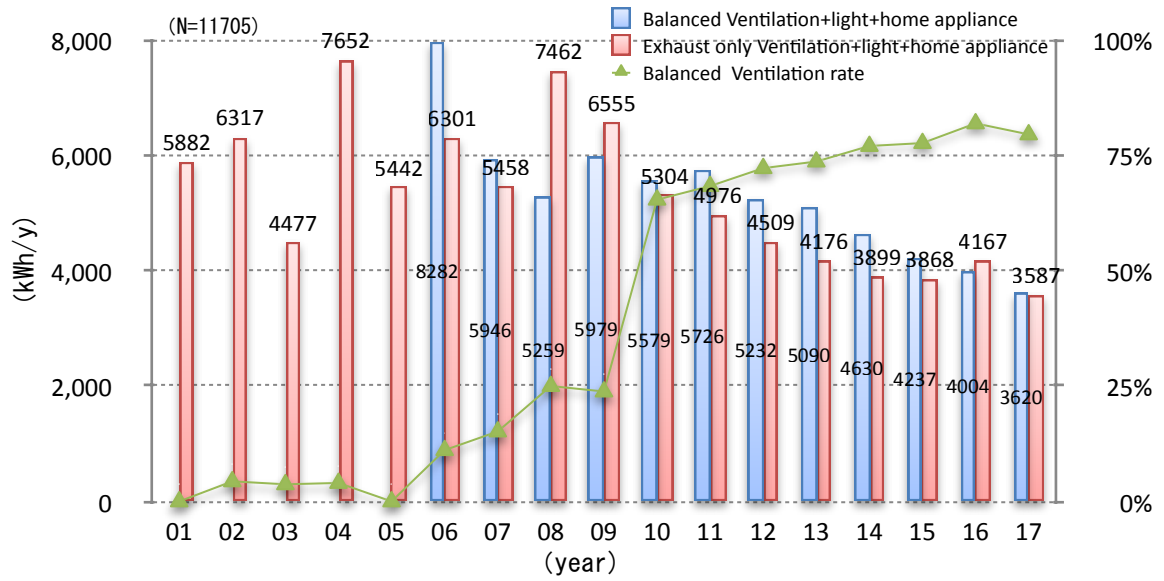


图4.3-19 Annual power consumption except for AC & WH in Zone 6

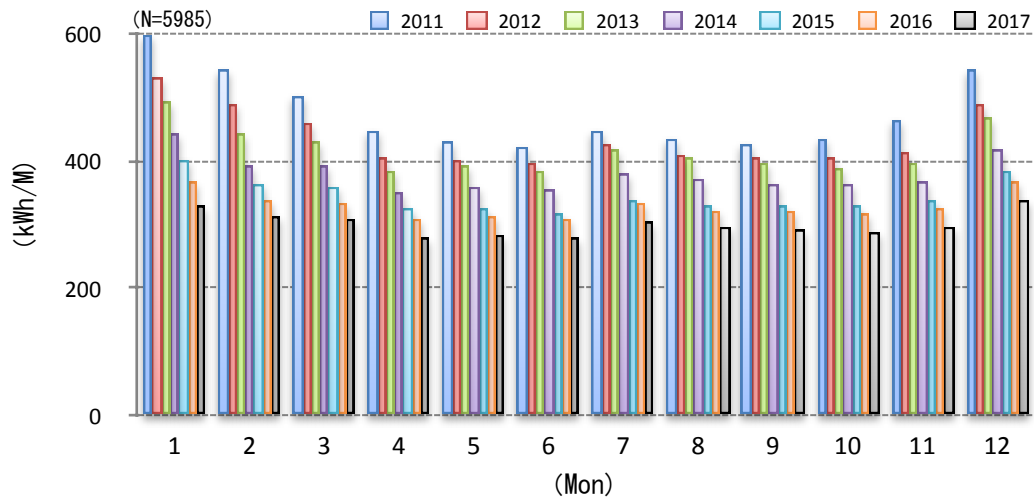


图4.3-20 Monthly power consumption except for AC & WH in Zone 6 (Balanced-Ventilation)

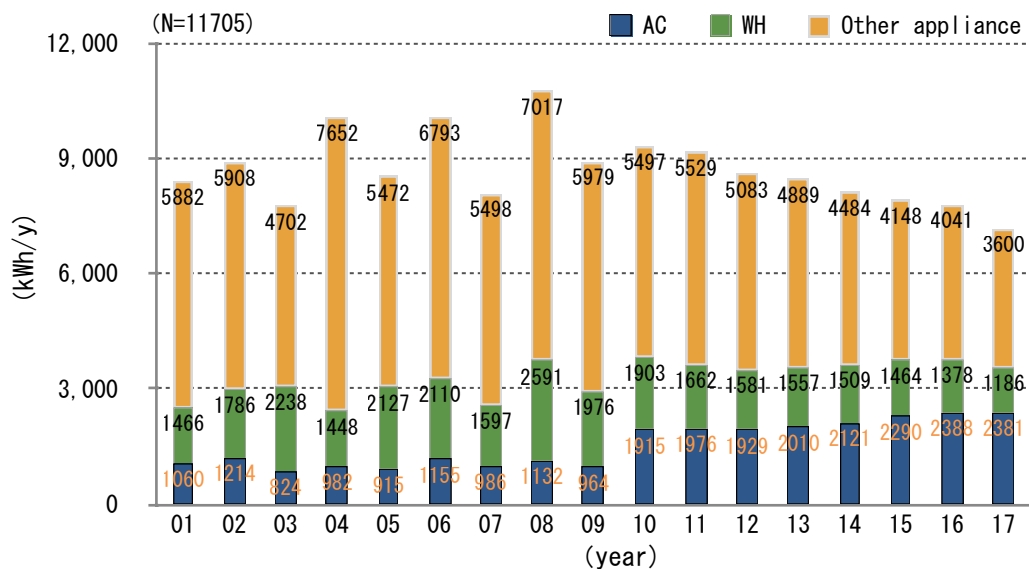


図4.4-1 Annual total power consumption by user in Zone 6

4-4 第4章まとめ

HEMSデータより主に省エネ基準のエリアの一般地域（6地域）における建築年毎の用途別エネルギー消費量の分析を行ってきた。図4.4-1は単世帯における総消費と用途別のエネルギー消費量をまとめて示している。約10年程で全室空調や一種換気システムの導入が進み、空気温熱環境は向上しながら、給湯、換気システムの効率化、家電の省エネ化、照明のLED化、さらに住宅自身の高断熱化によって約9000kWh/年あった年間総消費エネルギーは7000kWh/年以下となり約20～25%のエネルギー削減を実現していることが分かった。HEMSデータの蓄積と分析によって用途毎の省エネルギー傾向だけでなく季節、時間別消費電力の変化まで把握することができた。「その他家電」に占める割合が約50%と大きくその詳細を明らかにする事により、更なる省エネ化が実現できる可能性があるため、次の章で解析を進めていく。

第5章 建築年毎における換気及び家電機器別エネルギー消費分析

- 5.1 主要家電の年間エネルギー分析
- 5.2 主要家電の月間エネルギー分析
- 5.3 主要家電の時間別エネルギー分析
- 5.4 第5章まとめ

5.1 主要家電の年間エネルギー分析（単世帯）

図5.1-1は主な家電、居室、換気の建築年毎の年間エネルギー消費量を示している。まず最も消費電力が大きい換気については2014年に直流モーターが導入され年間のエネルギー消費は約1200kWhから600kWh程度に半減している。ただし各家電と比較するとまだ最も消費電力量は大きく削減余地の多い機器であることに間違いはない。次に冷蔵庫は560kWhから約400kWhまで30%ほど削減が進んでいる。制御のインバーター化や高断熱化が主要要因と考えられる。さらに影響が大きいのはリビングダイニングにおけるTV、ビデオ機器である。2017年も520kWh程度消費しておりTVのLED化など削減要因と画面の大型化、高性能化などの増加要因が重なり5%程度のエネルギー削減に留まっている。次に影響が大きいのはキッチン家電(IHヒーター、炊飯器、食洗機、電子レンジ)で合計すると2017年でも約500kWhほど消費している。IHヒーターは約20%エネルギー消費量の削減が進んでいるが他家電はほとんど進んでいないことがわかる。トイレや居室照明、サニタリーは合計で300kWh程度で全体への影響は少ないが30~40%ほど確実にエネルギー削減が進んでおり、照明のLED化、暖房便座、洗濯乾燥の削減が要因と考えられる。浴室乾燥は全館空調の導入により一旦半減し近年は増加傾向。これは主に洗濯の室内干しが浴室から全館空調を使った居室に移るなど機器の利用スタイルの変化が原因と考えられる。

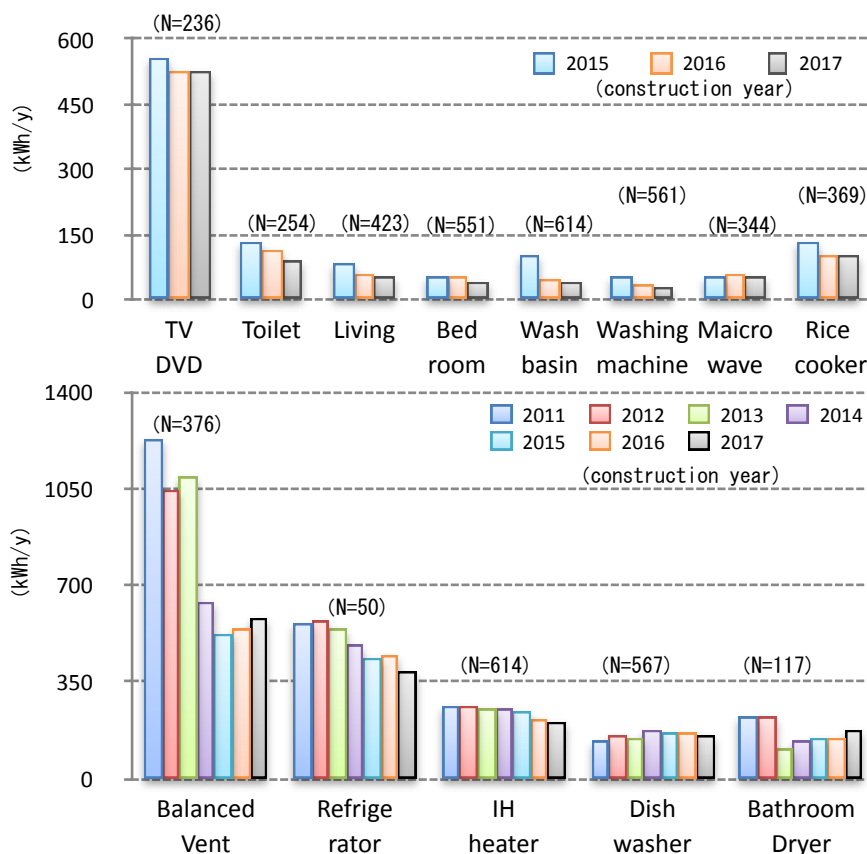


図5.1-1 Annual power consumption for other appliances

5.2 主要家電の月間エネルギー分析

図5.2-1は熱交換器付き一種換気システムの建築年毎の月間消費エネルギー量を示している。前述の通り換気モーターのDC(直流)化で年間消費量は半減していたが、月別に見ても年間を通じてほぼ半減していることがわかる。冬期に比べて夏期はやや消費電力が増加している。年間消費電力はまだ大きいため、熱交換が不必要な中間期などはバイパス機能をつけるなど更なるエネルギー消費量の削減が必要であると考えられる。

図5.2-2は建築年毎のLivingroomにおける照明を除くTVやDVD,他家電などの消費電力を示している。8,12月を除いて建築年が新しくなるほど各月で5~10%エネルギー消費量が削減している。年間を通じてほぼ一定のエネルギー消費量だが年末年始、春期、夏期など長期休暇の時期は若干消費電力が多めとなっている。

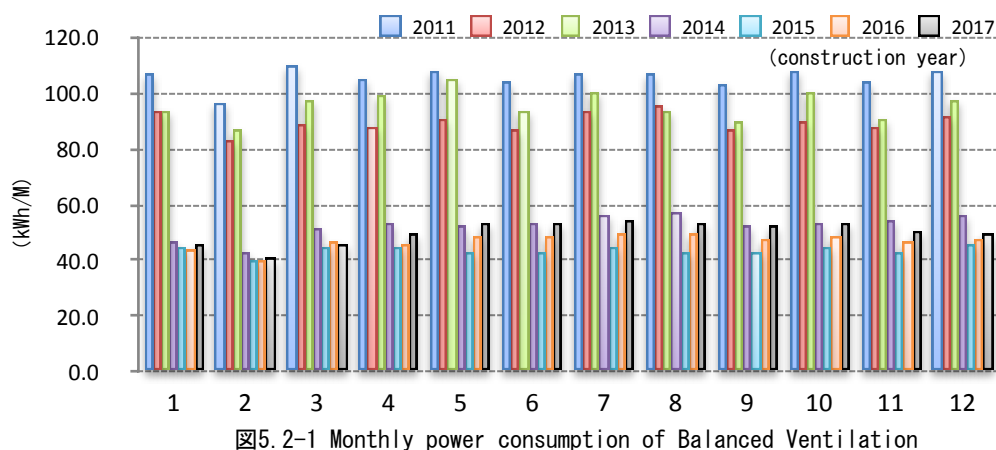
図5.2-3はリビングダイニングにおける主に照明の消費電力を示している。2015年よりオールLED化を進めておりわずか2年間で季節を問わず約30%のエネルギー削減が進んでいる。各月のエネルギー消費量は日照時間にほぼ比例する形で増減していることがわかる。

図5.2-4はトイレの建築年毎の月別消費電力を示している。照明の消費電力量はわずかながらほとんど暖房便座の電力と考えられる。2017年冬期はリビング照明よりも多くなっている。夏期の2016,17年の消費電力は僅かでありほぼ照明のみの消費電力と考えられる。中間期は2015年と比較して半減しており暖房便座のエネルギー削減が進んでいることがわかる。

図5.2-5は主寝室の建築年毎の月別消費電力を示している。照明のLED化が進み2017年は各月で20~40%エネルギー消費量が削減している。7~9月及び12~2月は消費量が建築年を問わず増加しており、照明以外の何らかの機器利用が原因と考えられる。

図5.2-6は洗濯機の建築年毎の月別消費電力を示している。建築年に関わらずどの月も2年間で約30%のエネルギー削減を達成している。季節毎の増減はあまり見られず消費電力は水温や気温に依存しないことが分かる。

図5.2-7洗面・サニタリーの建築年毎の月別消費電力を示している。2016年はすべての月で2015年と比較してエネルギー消費量は半減している。2017年はさらにすべての月で約5%削減していることがわかる。



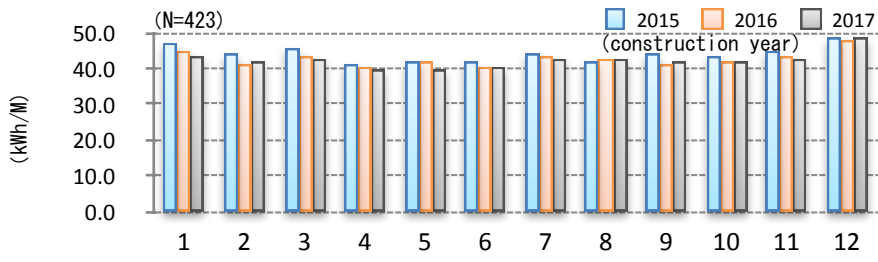


图5.2-2 Monthly power consumption Appliance of living

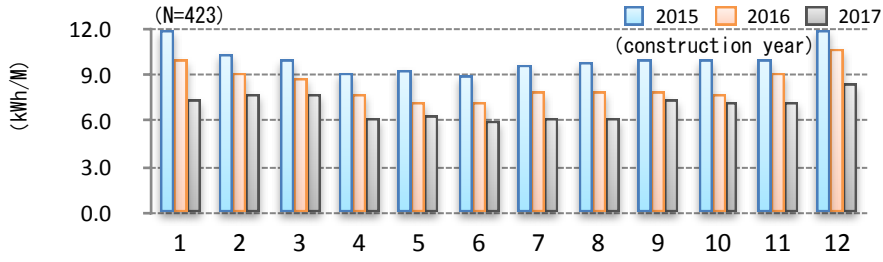


图5.2-3 Monthly power consumption Light of living

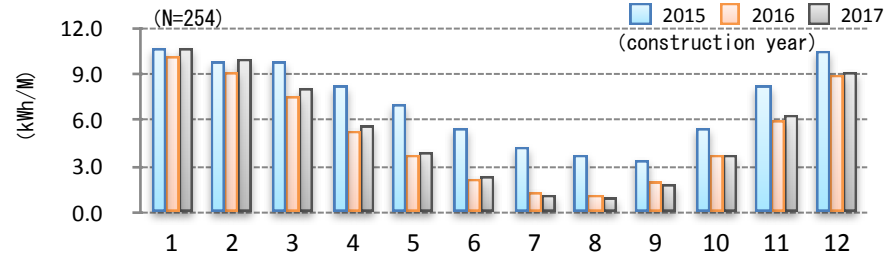


图5.2-4 Monthly power consumption of Toilet

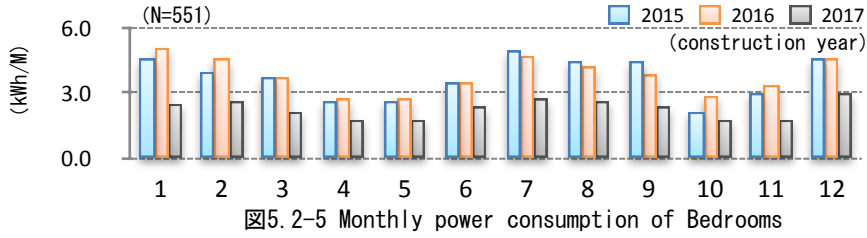


图5.2-5 Monthly power consumption of Bedrooms

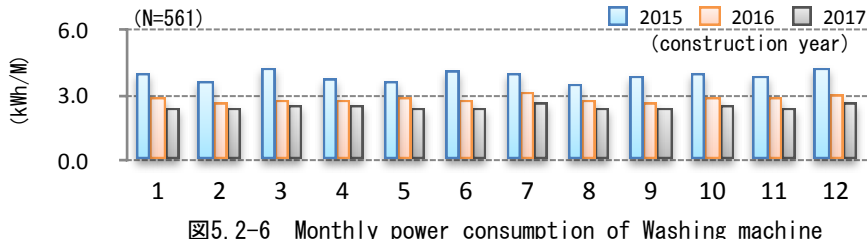


图5.2-6 Monthly power consumption of Washing machine

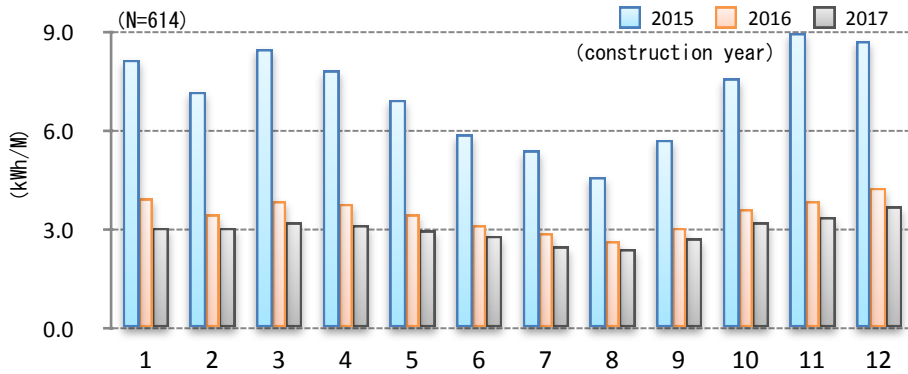


图5.2-7 Monthly power consumption of Washbasin

5.3 主要家電の月別及び時間別消費量

図5.3-1は冷蔵庫の建築年毎の月別エネルギー消費量を、また図5.3-2,3は2月と8月の時間別消費量を示している。建築年が新しくなるほど、どの月も確実に削減している。季節別に見てみると夏期と比較して冬期は40～55%ほどエネルギー消費量が小さいことが分かる。また2月の時間別で2017年建築邸は1日の消費量がほとんど変化がないのに対して2011年は朝、昼、夜間とそれ以外の時間帯で約20%消費量に開きがある。これは8月になると2017年建築年でも例えば4時と20時では20%以上の開きが認められる。調理や物の出し入れで頻りに冷蔵庫のドアが開けられる時間帯ではエネルギー消費量が増加していることがわかった。

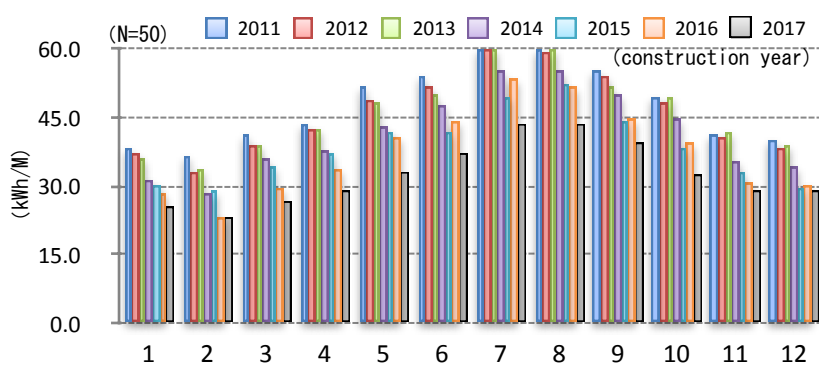


図5.3-1 Monthly power consumption of Refrigerator

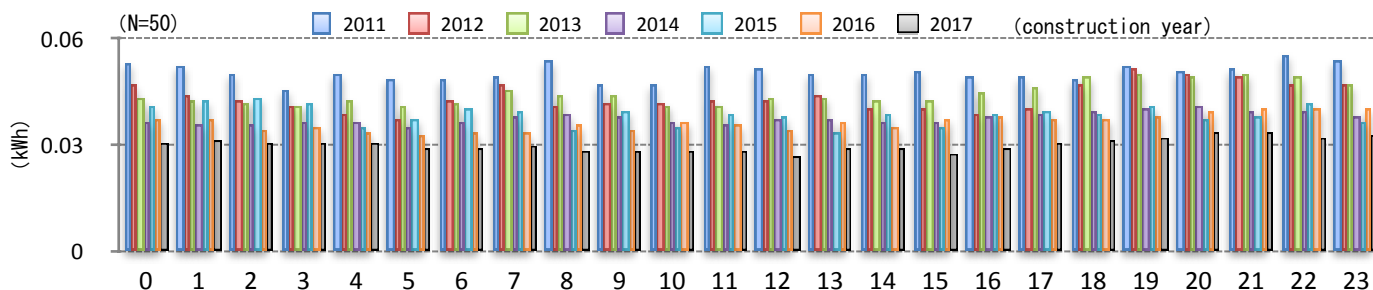


図5.3-2 Hourly power consumption of Refrigerator in Feb

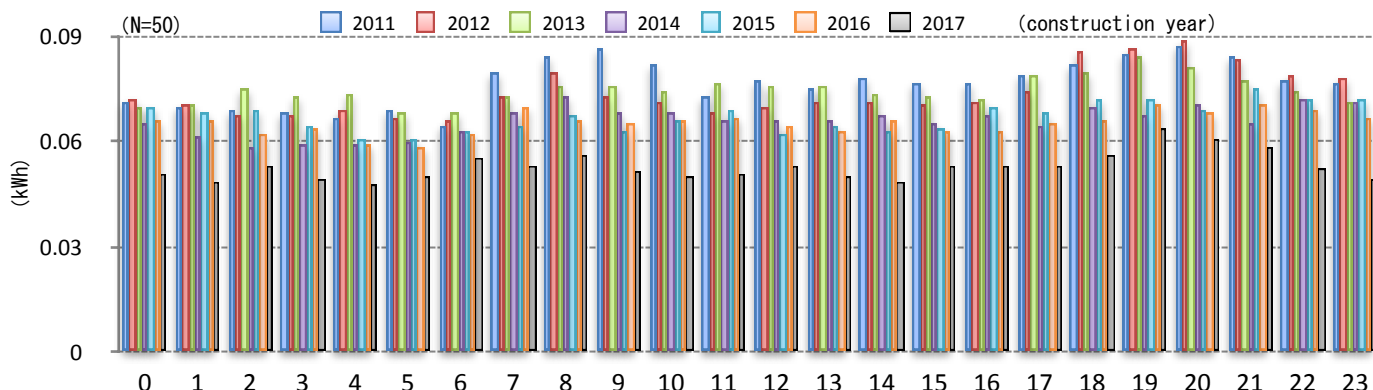


図5.3-3 Hourly power consumption of Refrigerator in Aug

図5.3-4建築年毎の月別、図5.3-5時間別2月のIHヒーターのエネルギー消費量を示している。建築年が新しくなるほどどの季節においてもエネルギー削減が進んでいる。更に時間別では朝食の時間帯は約半減している。機器の効率化だけではなく朝食時点での調理方法の違い（時間短縮のため調理をしない）など利用方法、生活スタイルの違いによってもエネルギー消費に違いが出ていることが分かる。夏期は冬期と比較して25～30%ほど消費量が小さく、水温と調理方法の違いが主な要因と考えられる。

図5.3-6は食洗器の建築年毎の月別エネルギー消費量を、また図5.3-7は2月の時間別消費量を示している。これまでの家電とは違い建築年が新しくなるほどエネルギー消費は増加している。最近の建築年ほど23～3時の深夜時間帯に合わせてタイマー運転していることが分かる。逆に朝食時間帯はIH同様に使用量が減少傾向にある。入居後数年経つと家族人数の増加や成長に伴って朝食後は利用頻度が上がり、夕食後は利用頻度が下がっていると考えられる。

図5.3-8は浴室乾燥機の建築年毎の月別消費量を、また、図5.3-9は2月の時間別消費量を示している。2013,14年建築邸が最も消費電力が小さく16,17年は再び増加傾向になる。季節別に見ると、冬期と梅雨期の使用量が多く、夏期と冬期の電力差は3倍以上あり他の家電と比較しても最も開きが大きいことが分かる。時間別では食洗器とは違い23時の深夜電力時間帯を待たずして19時ごろから使用していることが分かる。

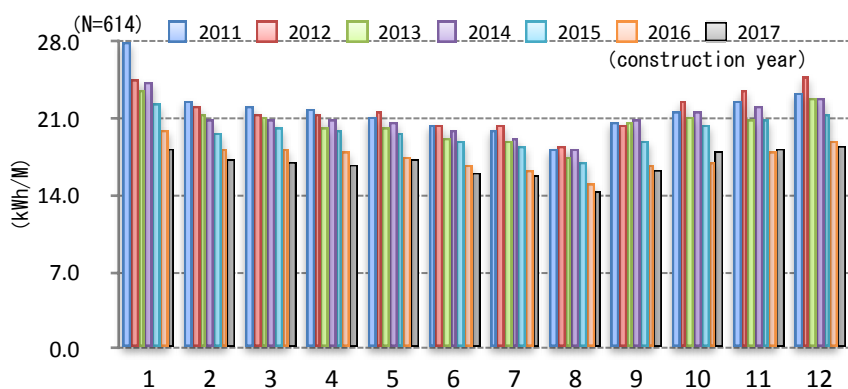


図5.3-4 Monthly power consumption of IH heater

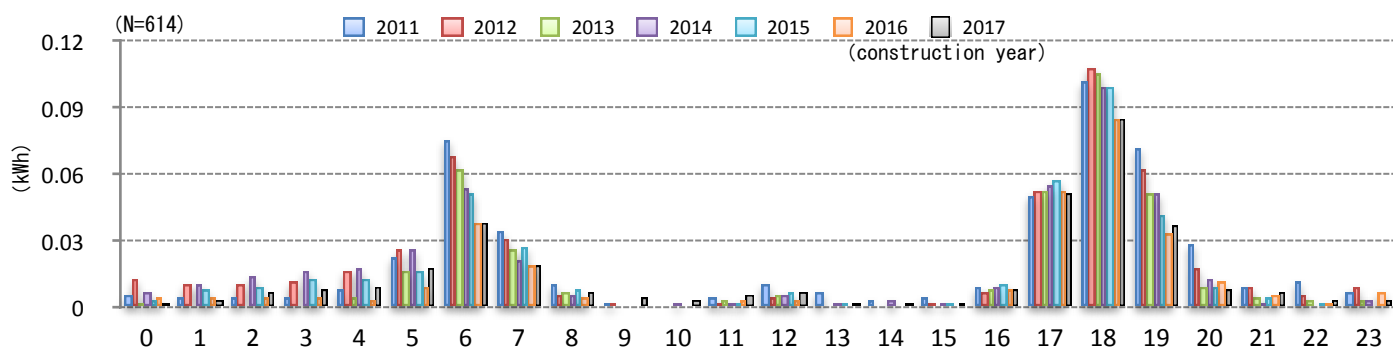


図5.3-5 Hourly power consumption of IH heater in Feb

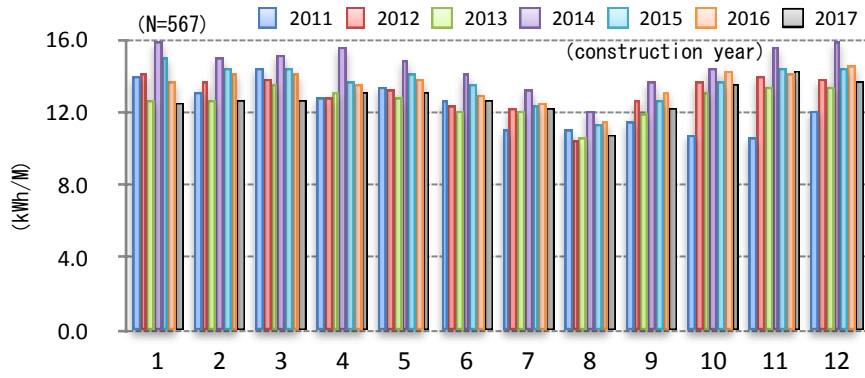


图5.3-6 Monthly power consumption for Dishwasher

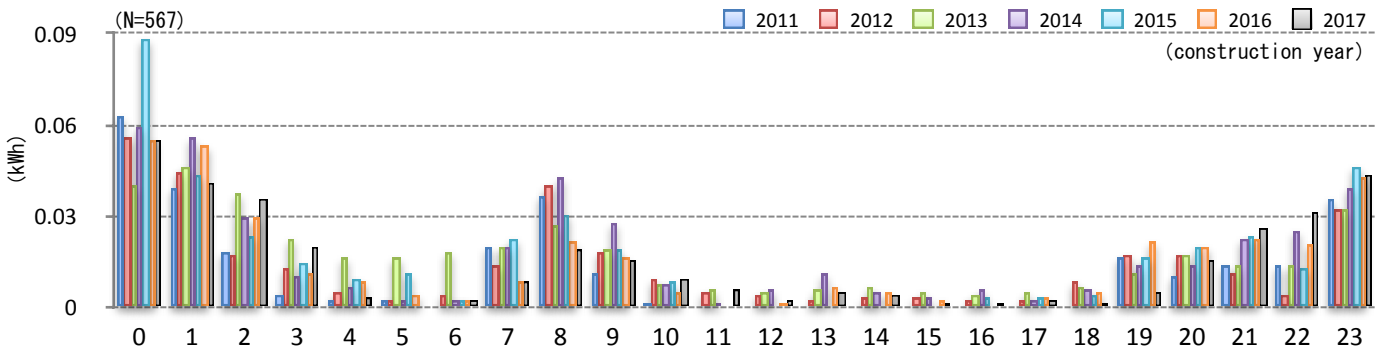


图5.3-7 Hourly power consumption for Dishwasher in Feb

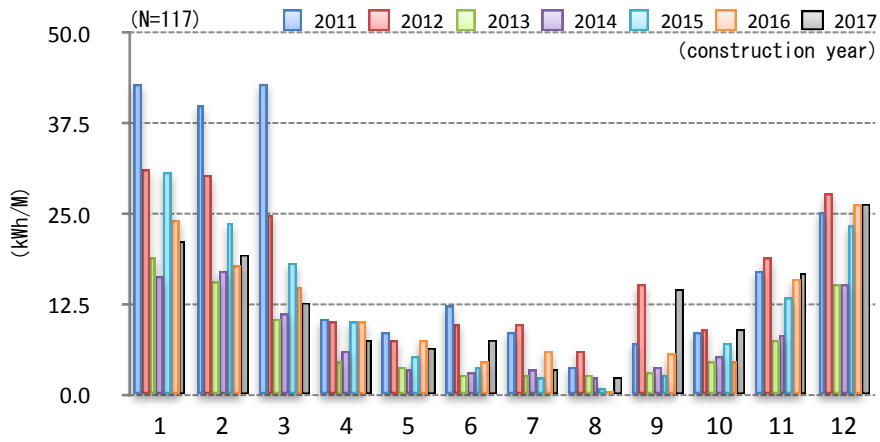


图5.3-8 Monthly power consumption for Bathroom dryer

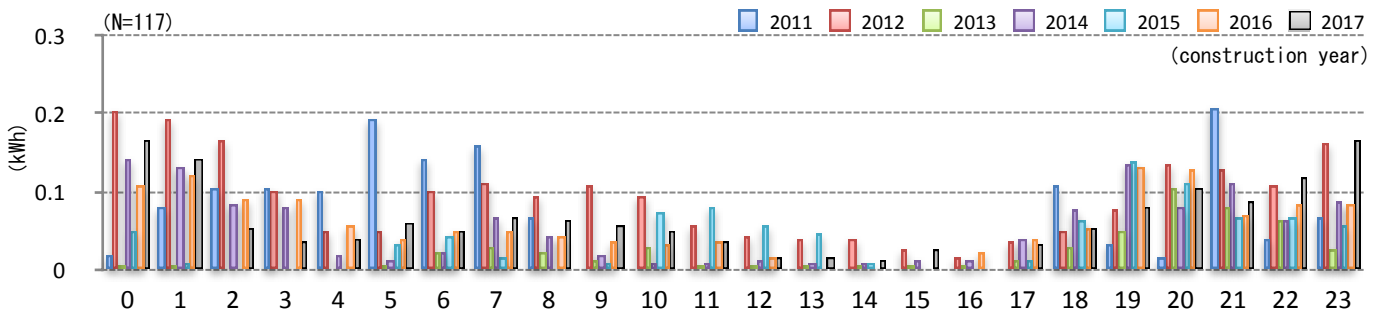


图5.3-9 Hourly power consumption for Bathroom dryer in Feb

5.4 まとめ

HEMSデータを活用し全消費電力の約半分を占める換気と家電について分析を進めた。国のトップランナー政策によって家電機器の効率化が着実に進み主要家電の多くが省エネルギーを達成していることが判明した。しかしながら換気、冷蔵庫、TVなどは其々でまだ500kWh/年あり総消費量に占める割合はまだ多く、今後もエネルギー消費量の削減が求められる。照明のLED化やその他高機能、効率化によって多くの家電で省エネが進んでいる。生活スタイルの変化(家族人数の増加もしくは成長)によって食洗機や乾燥機などエネルギーの増加が認められたものに関しては、今後建築年別ではなく同一建築年で時系列に分析を進めていく必要がある。また食洗機や比較的最近の浴室乾燥機などは電力料金に合わせて利用されており今後のデマンドレスポンス(DR)等に活用できる可能性がある。今後も快適性を向上させながら省エネ化が進み一部はDRに対応することによって、太陽光発電や蓄電池、エコキュートを最適に組み合わせ、IOTの進化で誰もが使いこなせる自家消費型のスマートハウスがより低価格で供給することができれば日本の住宅分野でのCO₂削減や系統安定、快適性向上につながる。そのためにその他家電としてはまだ500~800kWhほど判明していない使用用途がありその深掘り分析、更にHEMSデータは太陽光発電や蓄電池を組み合わせた分析を進めていくことが必要である。

第6章 太陽光発電と蓄電池を含む消費実態と収支試算

- 6.1 取得データと分析対象
- 6.2 収支試算方法
- 6.3 年間、月間エネルギー収支試算
- 6.4 PVとBESの季節毎の時間別エネルギー収支
- 6.5 カテゴリー別エネルギー試算
- 6.6 第6章まとめ

6.1 取得データと分析対象

本章はまず、スマートハウスを構成する重要要素であるPVと蓄電池のエネルギー収支実態の把握を行う。次に、今後FIT(固定価格買取制度)価格の低下によって、深夜電力を積極的に利用してきたライフスタイルから、PVの余剰電力活用に変化していき、その時の指標として重要になる『自給率』等を試算することで再生可能エネルギーの活用、系統電力の安定、災害時の安心に繋がる住宅の普及や政策立案に役立てていただく事を目的としている。表3.1-1はHEMSの主な取得データを示している。静的データとして建築地、建築年、各階床面積、断熱性能、入居者数、家族構成の他に休日、各設備機器の仕様、電力契約コースなどを取得している。動的データとしては、住戸全体と主要設備機器(全館空調(Central Air Conditioner:CAC),個室空調(DeCentral Air Conditioner:DCAC),ヒートポンプ式給湯機(Heat Pump Water Heater:HPWH),電気自動車充放電システム(Vehicle to Home system:V2Hsystem))のエネルギー消費量、PV発電量、蓄電池充放電量、売買電量、自家消費量を時間別に取得、更に日,月,年別に集計し蓄積している。次に表3.1-3は、省エネルギー基準における地域区分(以下:省エネエリア)別のデータ取得世帯数(HEMS設置戸数)を示している。6地域が最も多く約2.5万となっているため、本章も十分なN数が確保できる一般地域(6地域)で分析を進めていくことにする。

図6.1-1は、省エネエリア6地域における主な家族構成毎の床面積比率と対象数を示している。今回分析対象である、夫婦+子供の単世帯では110~130 m²がピーク(夫婦のみも同様)になっているのに対して、二世帯では140~180 m²になだらかなピークがあり、同時に200 m²以上にもボリュームが存在している。ちなみに、住宅土地統計調査¹³⁾において2018年の日本における持ち家の平均床面積は120.93 m²となっている。

図6.1-2全国と省エネエリア6地域の太陽光発電システムの発電出力毎の構成比率を示している。全体としては4 kW超が8割以上を占める中、5 kW台をピークに7 kWまでは各々10%以上を構成し、10 kWまでも比較的構成比率は高く10~11 kWでもう一つピークがありそれ以上は極端に低くなっている。

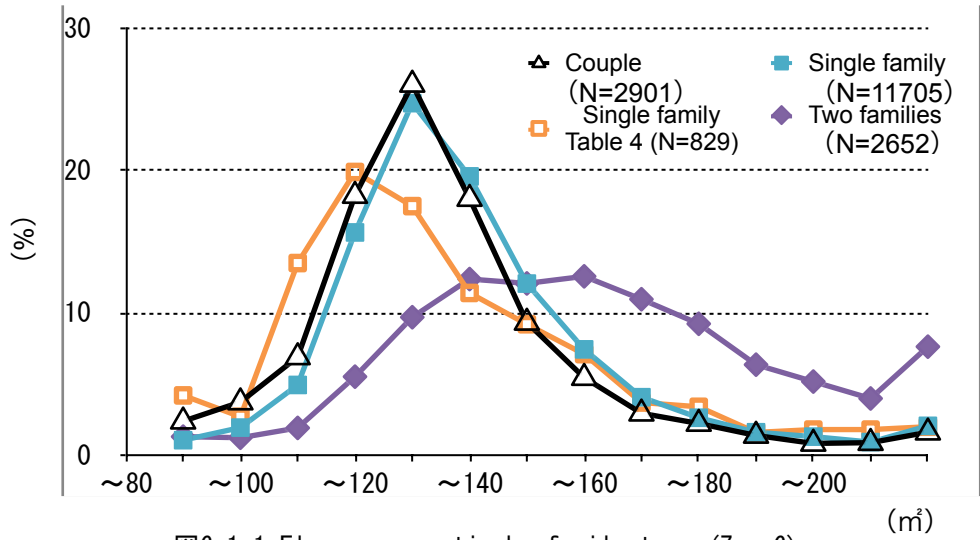


図6.1-1 Floor area ratio by family type (Zone6)

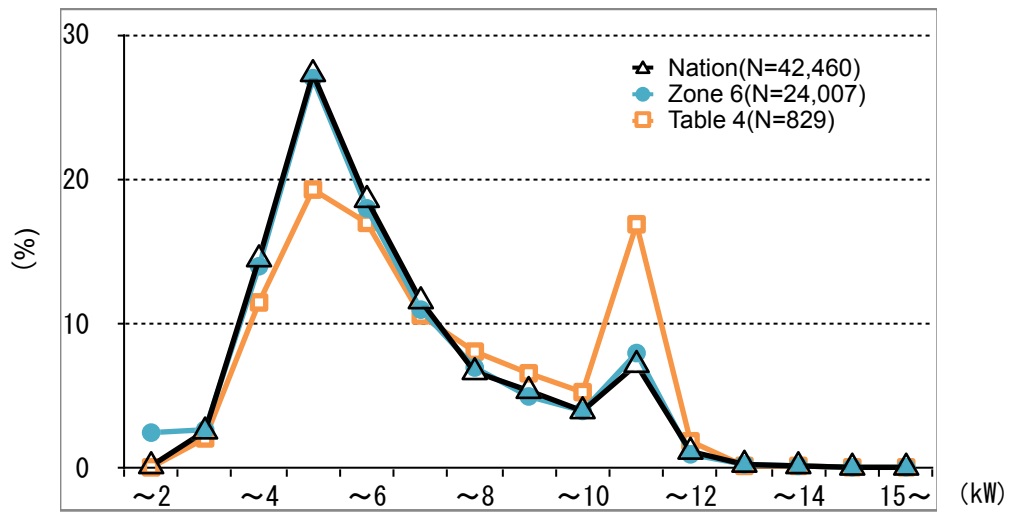


図6.1-2 PV users ratio by capacity

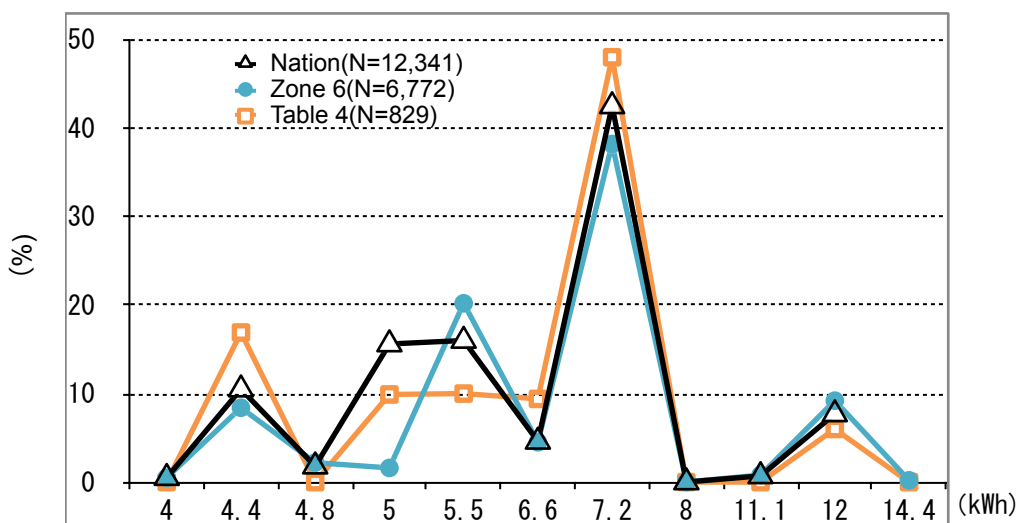


図6.1-3 Battery Energy Storage users ratio by capacity

図6.1-3は全国と省エネエリア6地域及び今回の分析対象の蓄電池容量毎の構成比率を算出している。導入されている蓄電池は、全て定置型家庭用リチウムイオン蓄電池である。系統電力とも連携されているタイプである。制御方法は、深夜時間帯に充電し、日中に買電が発生した場合に放電する「深夜充電(売電)モード」。太陽光発電の余剰電力を充電し、同じく買電が発生した時に放電する「グリーンモード」の2種類がある。どちらのモードもリモコン上で設定し、設定後は毎日自動で充放電される。途中でモードを変更することも可能である。容量の構成比率は7.2 kWhや5.5 kWhの中容量比率で50 %以上を占めている。4.4 kWhや5 kWhの小容量も合計で25 %以上となっている。また12 kWhの大容量にも小さなピークが認められる。PVも蓄電池も全国と6地域で構成比率に大きな差はない。

このことから今回の分析対象は表6.1-4に示した通り、PVは平均容量4(3~5) , 6(5.1~7) , 8(7.1~9) , 10(9.1~11) kWに区分(以下PV4,PV6,PV8,PV10)、蓄電池(Battery Energy Storage以下BES)は5 kWh以下の小容量 (以下BES(S)),5.1~8 kWhの中容量(以下BES(M))、大容量の8.1 kWh以上(以下BES(L))にカテゴリー分けし分析を進める。期間は2018年4月から2019年3月の1年間、サンプル数はデータ欠損などがない829戸を対象とした。

算出データは各カテゴリー毎に総消費電力量(Total Power Consumption 以下:TPC)、発電量(Power Generation 以下:PG)、買電量(Purchase Electricity 以下:PE)、自家消費量(Self Consumption 以下:SC)、売電量(amount of Electricity Sold 以下:ES)、充電と放電量(Charge Electricity and Dis Charge Electricity 以下:CE &DCE)を時間別で抽出し中央値を算出。『自給率(数式(1))』(又は自給自足率:Self-Sufficiency Rate (以下:SSR))とは消費電力量の内太陽光発電でまかなえた割合で住宅のエネルギー政策やスマートハウス普及において重要な指標の一つである。『稼働率(式(2))』(Operation Rate 以下:OR)とは蓄電池の有効活用を示す指標の一つとして算出した。『充放電効率(式(3))』(Charge and Discharge Rate 以下:CDR)は蓄電池システムの効率を示している。殆どの蓄電池は「深夜充電モード」で運用されているため、実充放電データをもとに「グリーンモード」に時間毎に変換し試算した。後は日、月、年間に積算している。後で述べる図6-2.1は各カテゴリーの中央値に最も近い世帯を選出し、上記試算を行った。

表6.1-4 Available HEMS data

	Single family energy conservation level Zone 6			
Floor space (㎡)	100~140			
Photovoltaic (kW.average)	4 (3~5)	6 (5.1~7)	8 (7.1~9)	10 (9.1~11)
Battery Energy Storage(kWh)	Small(4~5), Middle(5.1~8), Large(8.1~12)			
Year of construction	2013~2017			
Measurement period	2018/04 ~ 2019/3			
Number of households	829			
Extracted data	TPC,PG,PE,ES,CE,DCE			

$$SSR(\%) = \frac{\sum_{n=1}^{8760} [SC(t) + DCE(t)]}{\sum_{n=1}^{8760} TPC(t)} \dots (1)$$

$$OR(\%) = \frac{\sum_{n=1}^{8760} CE(t)}{\sum_{n=1}^{8760} BES(t)} \dots (2)$$

$$CDR(\%) = \frac{\sum_{n=1}^{8760} DCE(t)}{\sum_{n=1}^{8760} CE(t)} \dots (3)$$

- SSR*(%) : *Self-Sufficiency Rate* (自給率)
- SC*(kWh) : *Self Consumption* (自家消費量)
- DCE* (kWh) : *Dis Charge Electricity* (放電量)
- TPC* (kWh) : *Total Power Consumption* (総消費量)
- OR*(%) : *Operation Rate* (稼働率)
- CE* (kWh) : *Charge Electricity* (充電量)
- BES* (kWh) : *Battery Energy Storage* (蓄電池容量)
- CDR* (%) : *Charge and Discharge Rate* (充放電効率)

6.2 PVとBESのカテゴリ一別年間エネルギー収支

図6.2-1は年間のカテゴリ一別エネルギー収支を示している。PV8およびPV10では蓄電池容量が大きくなるほど年間買電量は減少傾向にあるが、PV4,PV6においては必ずしも買電は減少していない、その原因としてはBES(S)よりもBES(M)の方が総消費エネルギー(TPC)が増加していることが原因と考えられる。また、BES(L)ほどのPV容量においても買電量が3000 kWh以下となりPV6BES(L)が最少で1856 kWhまで減少する。充電量はPV4BES(S)が1435 kWhに対して、PV10BES(L)は3361 kWhまで増大する。売電量はPV6BES(L)が最小で1000 kWhでありその理由は発電量の内、放電に利用した割合が42.2 %と各カテゴリ一中最大のためと考えられる。逆に、売電量が最大になるのはPV10BES(S)で9156 kWh。PV6BES(S)と9倍以上の差が生じている。

図6.2-2各カテゴリ一の『自給率』と蓄電池の『稼働率、充放電効率』及び『自家消費量』を算出している。自給率が最も高いのはPV6BES(L)で74%、次いでPV10BES(L)の68%となっている全体的にPV容量及びBES容量が大きいくほど自給率は向上している。稼働率はBES容量が大きくなる程低下している。同一BES容量で比較するとPV容量が大きくなるほど稼働率は向上している。充放電効率は何も78~85%で推移しているが容量が大きくなるほど向上傾向にある。理由はハイブリッド型パワコン(PVとBESのパワコンを一体化したもの)の割合が大型になる程大きく、ロスが比較的少ないからだと考えられる。自家消費量もほぼBES容量に比例する形となっている。

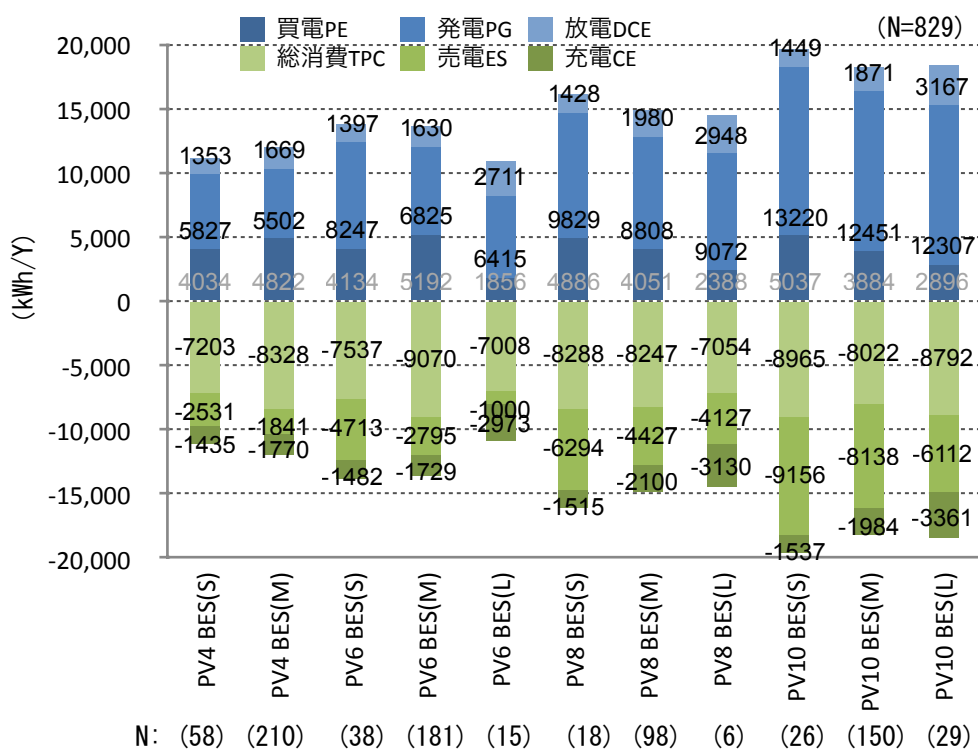


図6.2-1 Annual power balance for PV & BES

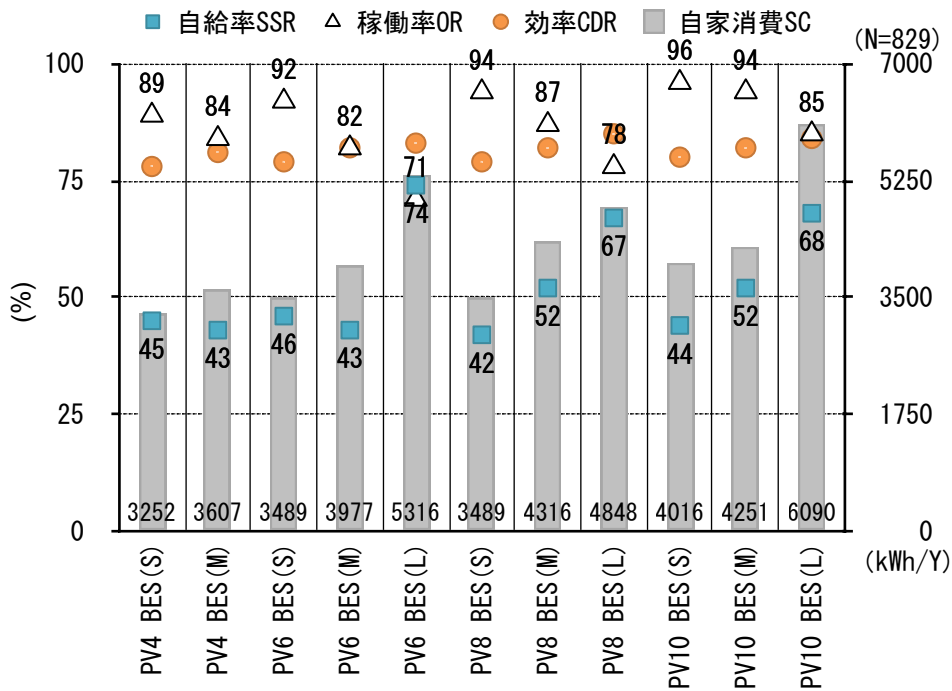


図6.2-2 Annual Self-Sufficiency Rate & Operation Rate, Charge and Discharge Rate for PV & BES

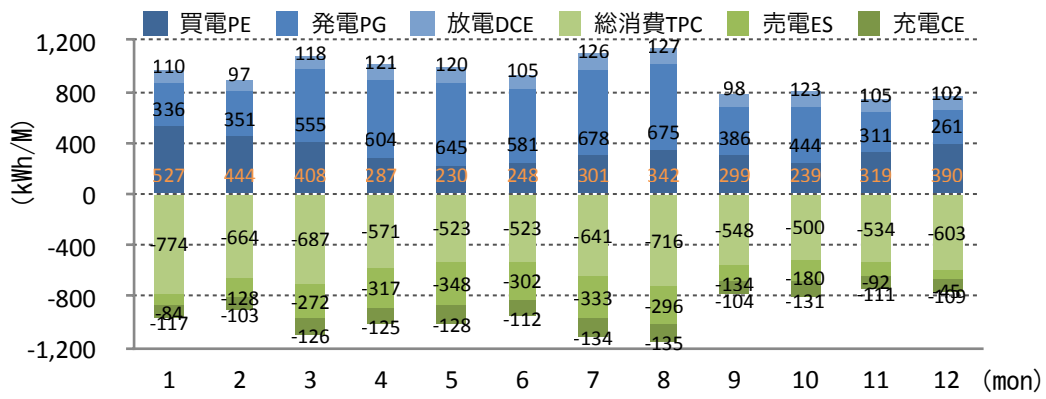


図6.3-1 Monthly energy balance for PV4 BES (S)

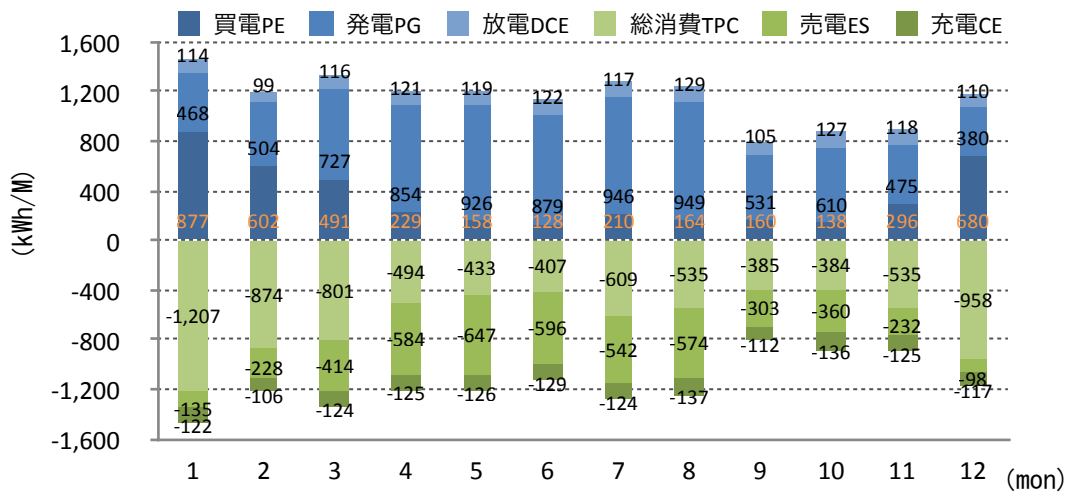


図6.3-2 Monthly energy balance for PV6 BES (S)

6.3 PVとBESのカテゴリ一別月間エネルギー収支比較

図6.3-1,-2,-3蓄電池容量が同じ(S)で、太陽光発電の容量が4 kW,6 kW,8 kWの月別のエネルギー収支を示している。多くの発電量が期待できる4~10月頃にかけてはPVが大きくなるほど買電量が減少していることがわかる。しかしながら図6.2-1からもわかるように総消費は増加傾向にあるため冬期の買電量は増加している。充電量に関してはほぼ年間を通じて、またどのPV容量でも一定量であることがわかる。蓄電池容量以上に余剰電力があるためだと考えられる。

図6.3-4と-5はPV容量8 kWで蓄電池の容量を(M)と(L)にした場合の月別エネルギー収支を示している。中間期や夏期の買電は蓄電池容量に比例して減少し、BES(L)の5月などは10 kWh/月以下まで減少する。冬期2月の買電についてもBES(S)と比較してBES(L)は570 kWh/月まで減少している。売電についても夏期8月はPV8BES(S)で841 kWh/月に対してPV8BES(L)は767 kWh/月にまで減少、冬期2月の売電はどちらも約300 kWh/月となっている。蓄電池容量の大型化は自給率の向上と買電、売電の減少に貢献していることがわかる。

図6.3-6は各カテゴリ別の月毎の自給率と稼働率を示している。PV容量と蓄電池容量が大きいほど自給率も全般的に高まる傾向にあるが、冬期は25 %程度にまで下がってしまう。ただしPV8BES(L)だけは冬期も45 %あり夏期は80 %、中間期では95 %程度まで上昇している。冬期でも45 %の高さを維持している理由としては、図6.3-5より冬期でも買電量に対して比較的発電量も多く、また発電量に対して放電割合も高いためと推測される。

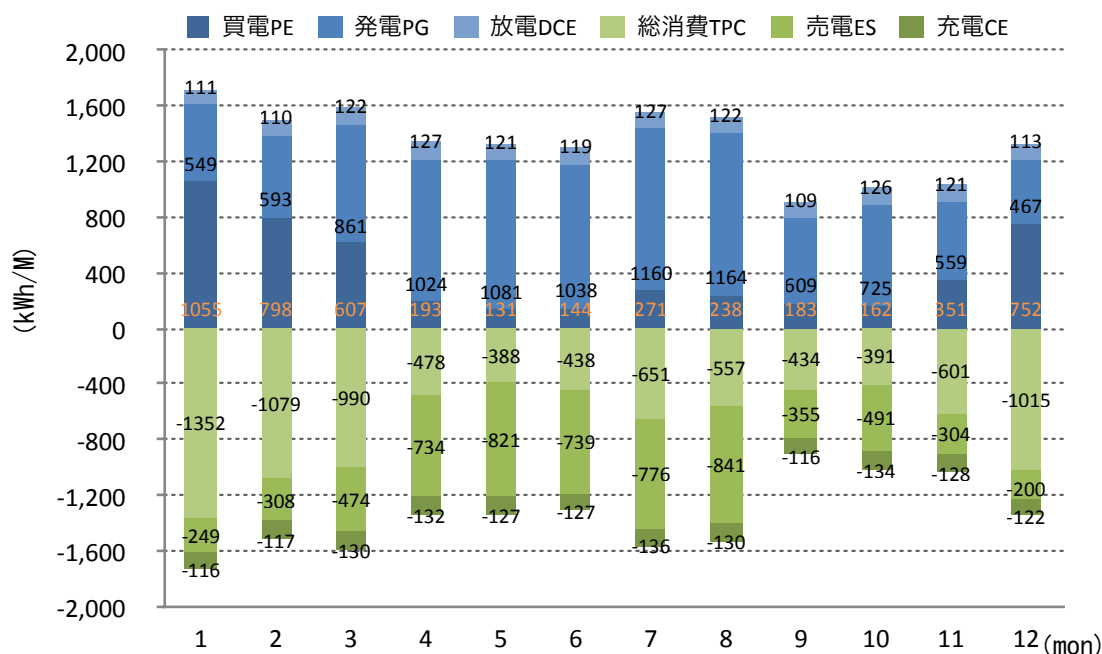


図6.3-3 Monthly energy balance for PV8 BES (S)

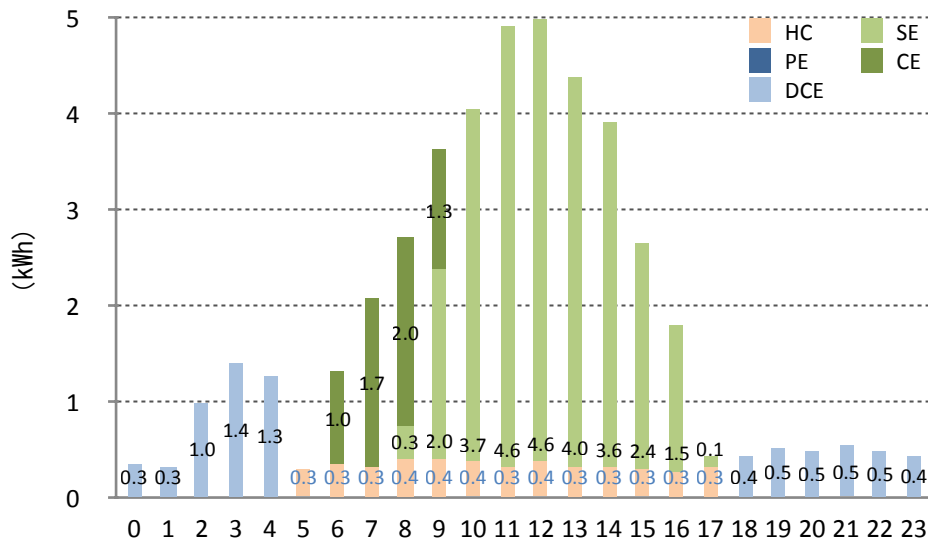


図6.4-1 Hourly energy balance for PV8 BES(L) in MAY

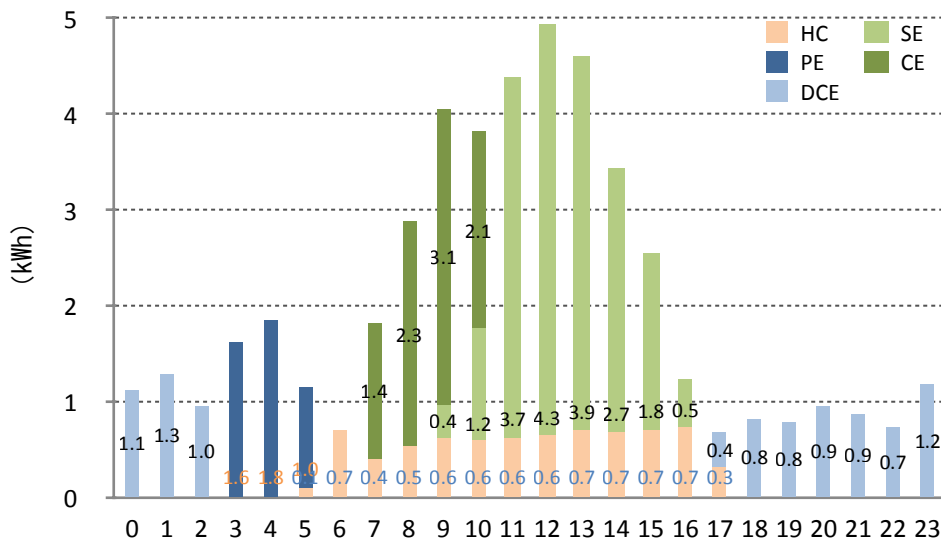


図6.4-2 Hourly energy balance for PV8 BES(L) in AUG

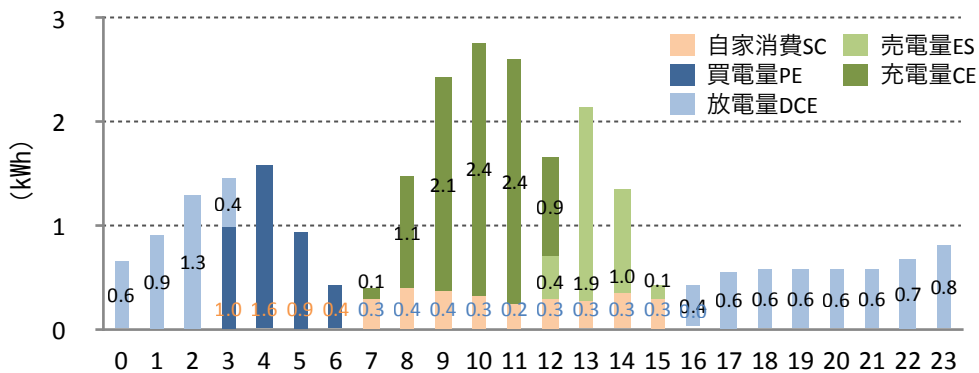
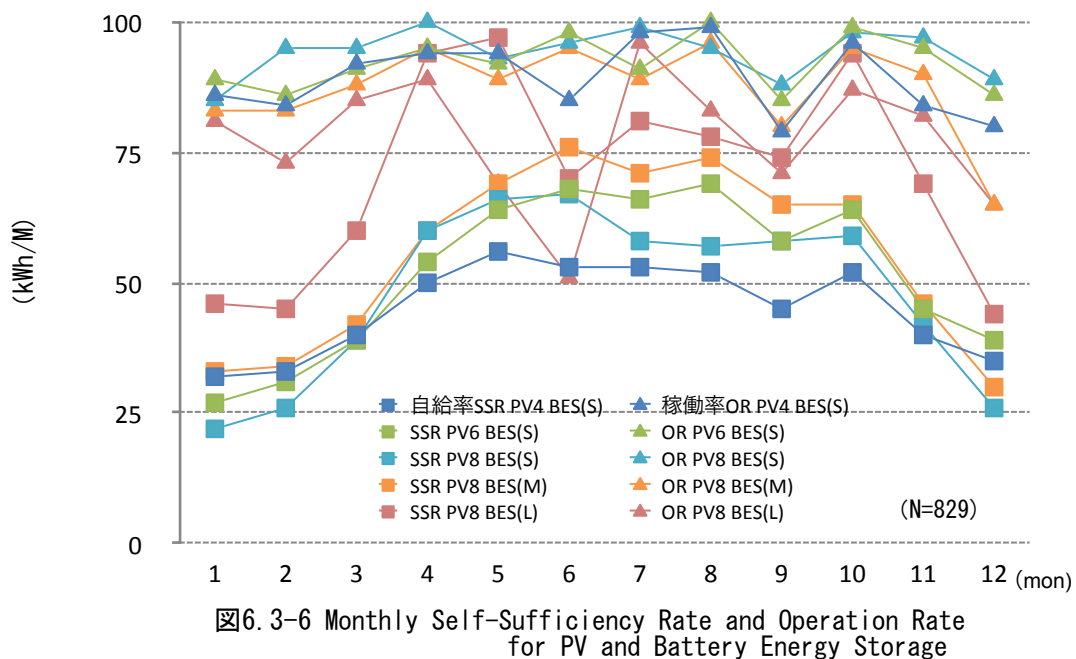
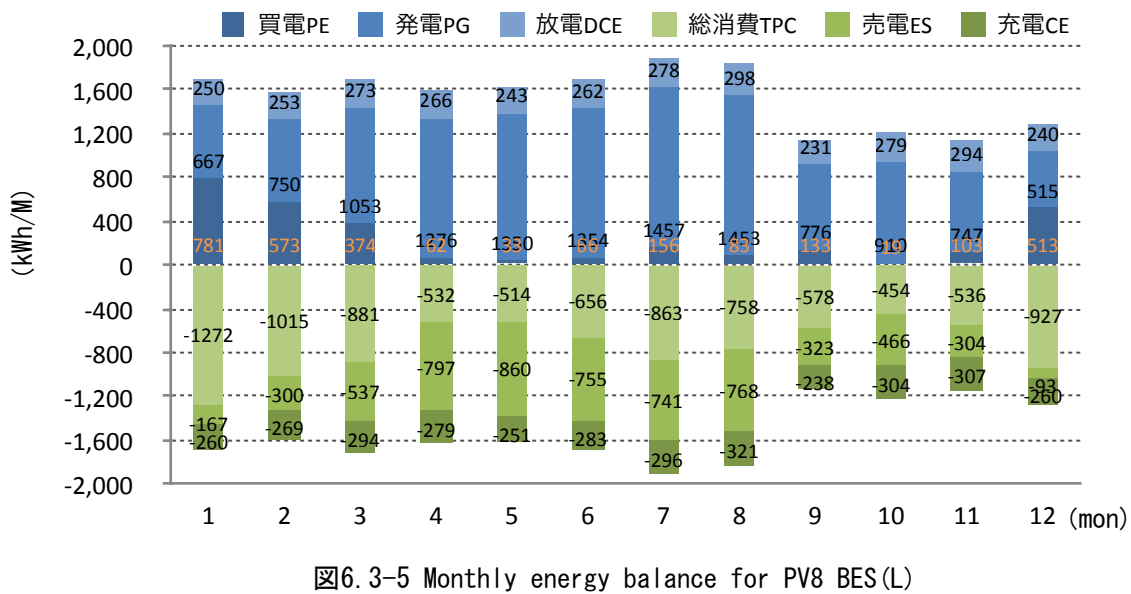
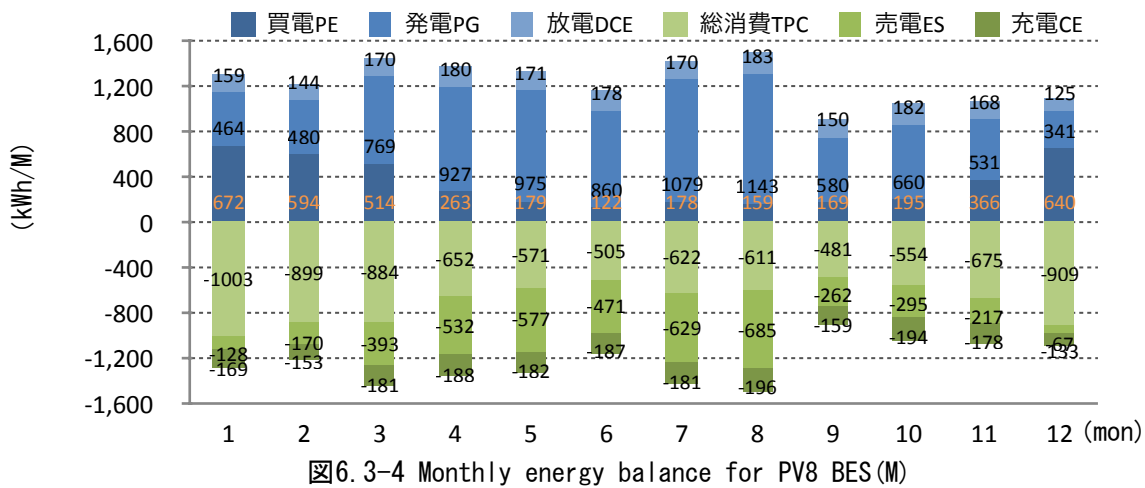


図6.4-3 Hourly energy balance for PV8 BES(L) in NOV



6.4 PVとBESの季節毎の時間別エネルギー収支

図6.4-1から-2,-3,-4はPV8 kW BES(L)時のそれぞれ中間期、夏期、冬期における1日の時間別エネルギー収支を示している。

図6.4-1の5月に於いては1日の発電量が37 kWh程度まで増加し発電も5時台から18時近くまで続く。充電についても9時台で満充電となり、発電が終了する18時台から放電が始まり、翌日の5時台まで放電が続く。つまり自給率は100%に達していることがわかる。余剰電力に十分余裕があるため深夜の給湯エネルギーや将来的な電気自動車の充電に利用できると思われる。

図6.4-2は8月のエネルギー収支を示している。自家消費は冷房も加わるため約7 kWhに増加している。10時台に満充電となり5月と同じく十分な余剰電力が得られている。17時台から放電を開始し翌日3時台から買電が始まる。買電が発生しているのは3時から5時の僅か3時間のみとなっている。

図6.4-3は11月のエネルギー収支を示している。昼間の自家消費は3 kWh以下まで減少する。発電量も5、8月と比較すると減少し12時で満充電となる。16時から放電を開始し翌3時まで放電が続く。また、3時から6時までは買電が発生しており、この買電は主にヒートポンプ式給湯機の消費電力と考えられる。一方で、余剰電力(売電量)が3.5 kWh残っているため、ヒートポンプ式給湯機を深夜ではなく、この余剰電力で稼働することができれば一日の電力量はほぼPVで賄えることになる。

図6.4-4の2月において1日の発電量は約20 kWh程度で日照時間も短いため発電は7時から16時までとなっている。その発電の殆どは自家消費と充電に充てられている。売電量は約1.5 kWhとなっている。放電は16~0時まで継続するが、その後朝まで約12 kWhほどの買電が必要となっている。前報までの研究から主に暖房と給湯エネルギーに利用されていると考えられる。

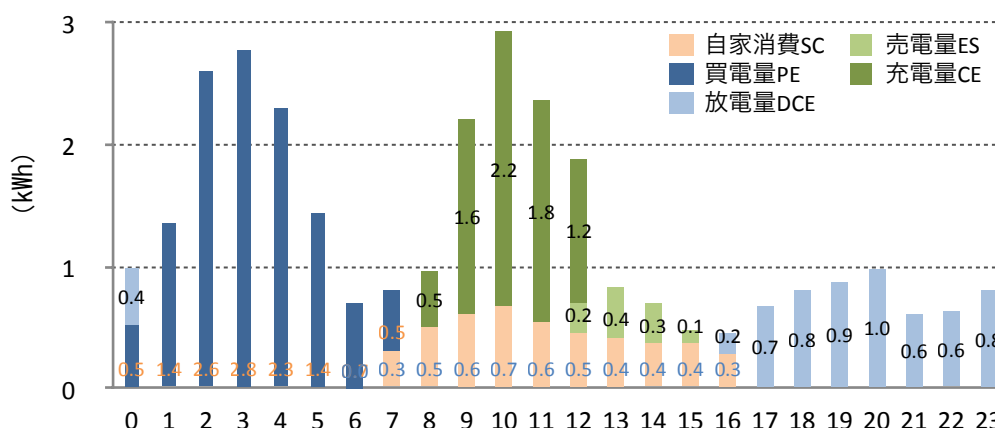


図6.4-4 Hourly energy balance for PV8 BES(L) in FEB

6.5 各カテゴリー別エネルギー収支

図6.5-1は世帯人数毎のPV発電容量別自給率(SSR)及び総消費量(TPC)を整理した結果である。(箱の中央線：中央値、箱の上端：75%点、箱の下端：25%点、髷上限と下限：最大値と最小値、○：外れ値、米：極値)世帯人数の増加でTPCも増加傾向にあるためエネルギー自給率は低下していく傾向にある。PV容量が大きいほど自給率も高くなる傾向にあり、世帯人数が2人から5人までの間(主に単世帯)ではPV 10kWの場合に自給率が最も高くなる。世帯人数が増えると自給率は40%程度に低下していることがわかる。

図6.5-2は建築年毎のPV容量別自給率(SSR)と総消費量(TPC)を示している。どのPV容量においても建築年が新しくなるに従って総消費量は減少傾向である。自給率は建築年が新しくなる程PV8,10は高まる傾向に、PV4,6は横ばい傾向である。'16年以降はPV容量が大きいほど自給率は向上しており、年間を通じて昼間の自家消費や蓄電池の余剰電力充電が十分に生かされているためと考えられる。2017年は総じて自給率が向上している。これも前報の分析より給湯やその他家電の省エネ化に加えて、断熱性能の向上によって冷暖房エネルギーも減少したためと考えられる。

図6.5-3.1は換気種類毎、図6.5-3.2は空調種類毎のPV容量別総消費量(TPC)と自給率(SSR)を示している。第1種換気(Type1)と第3種換気(Type3)では、PV容量が4kWの時は3種換気の方が自給率も高くなるが、他のPV容量の場合は、昼間も一定の消費電力が発生する一種換気の方が、自給率は向上し消費量も若干増加傾向にある。全室空調(CAC)とエアコン(DCAC)を比較した場合、PV容量が大きくなるに従って自給率はDCACを逆転してCACが高くなっている。余剰電力を充電し夜間の冷暖房に利用することによって、PV10の場合全室空調を利用しながら63%まで自給率が向上している。

図6.5-4は延べ床面積毎のPV容量別自給率(SSR)と総消費量(TPC)を示している。どの面積区分でも共通して自給率と消費量はPV容量が大きくなる程向上及び増加傾向にある。消費量に関しては床面積が大きいほど増加傾向にあり、前報より160 m²以上は二世帯の割合が多く昼間の消費電力が増加するため消費量が更に増加傾向にある。一方、自給率に関しては逆に床面積が増加するほど総消費量も増加するためどのPV容量においても低下傾向となっている。

図6.5-5は蓄電池容量毎のPV容量別自給率と総消費量を示している。どのPV容量でも蓄電池容量が大きくなるほど自給率は高くなっている。同じ蓄電池容量で見るとPV容量が大きくなるに従って総消費量も増大しているため、必ずしもPV容量と自給率は比例関係にはないことがわかる。

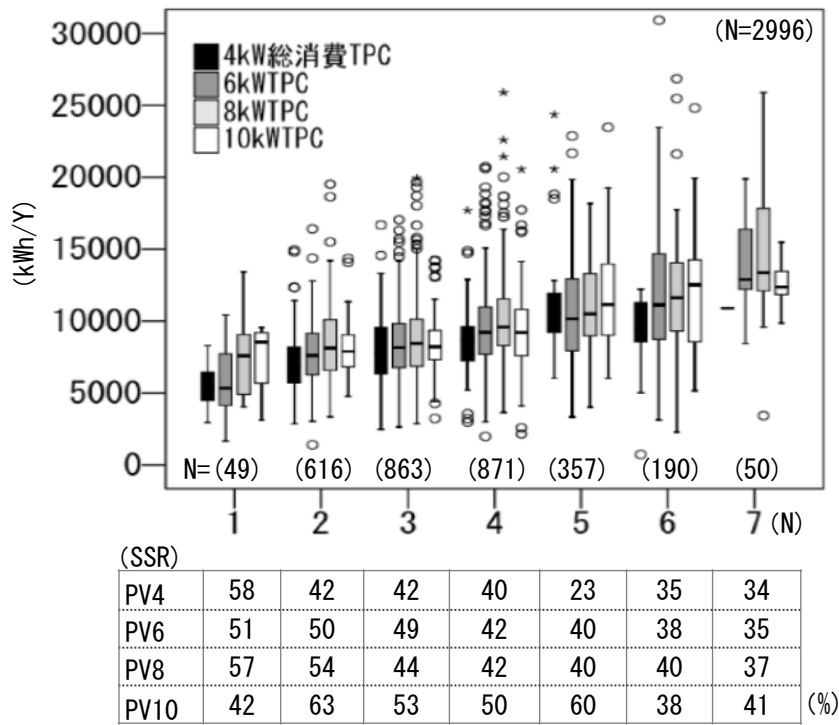


図6.5-1 Annual Total Power Consumption and Self-Sufficiency Rate for number of family

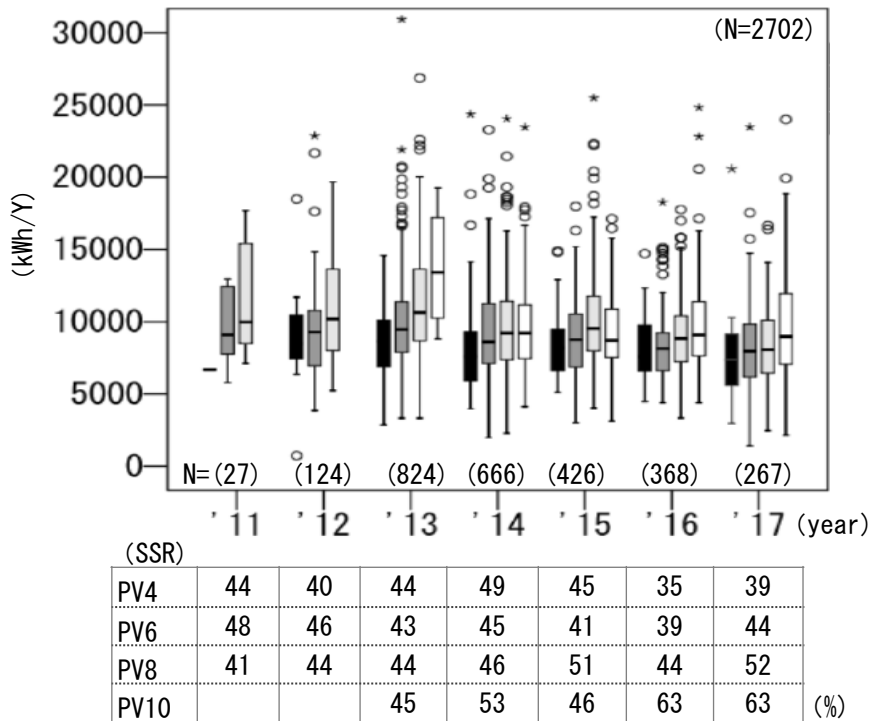


図6.5-2 Annual Total Power Consumption and Self-Sufficiency Rate for Year of construction

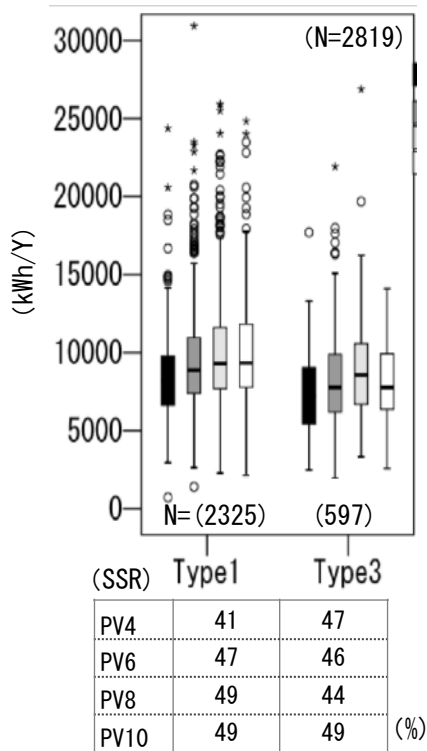


図6.5-3.1 Annual Total Power Consumption and Self-Sufficiency Rate for Type of ventilation

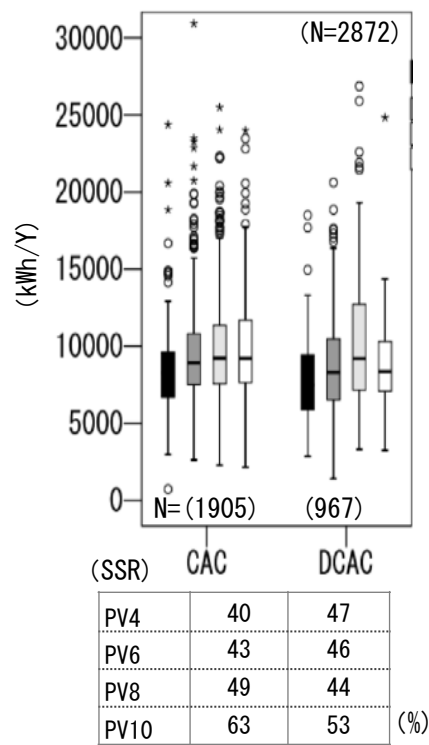


図6.5-3.2 Annual Total Power Consumption and Self-Sufficiency Rate For CAC and DCAC

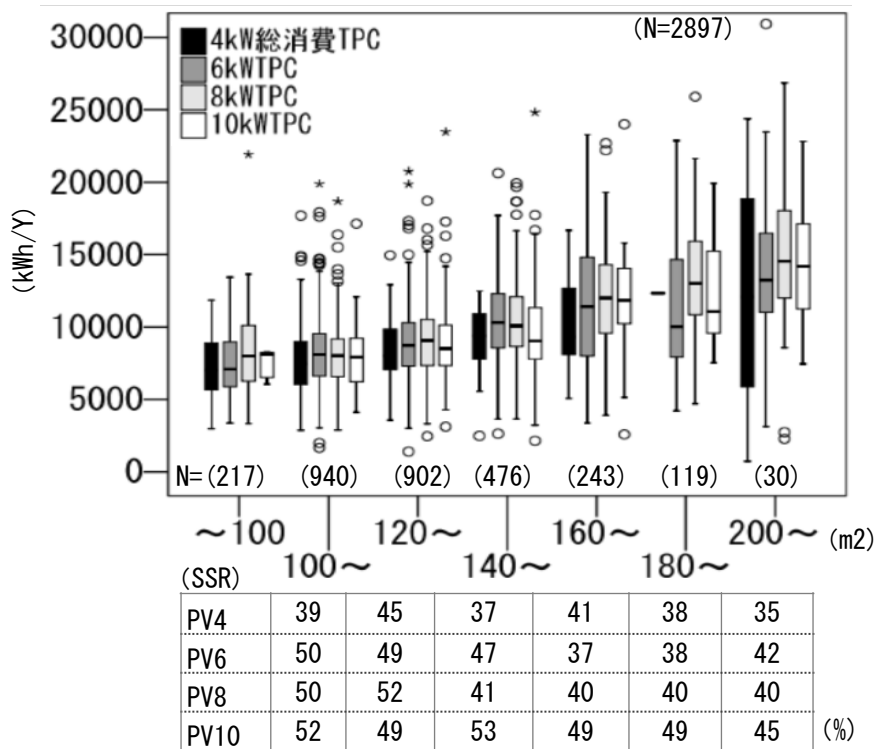


図6.5-4 Annual Total Power Consumption and Self-Sufficiency Rate for floor space

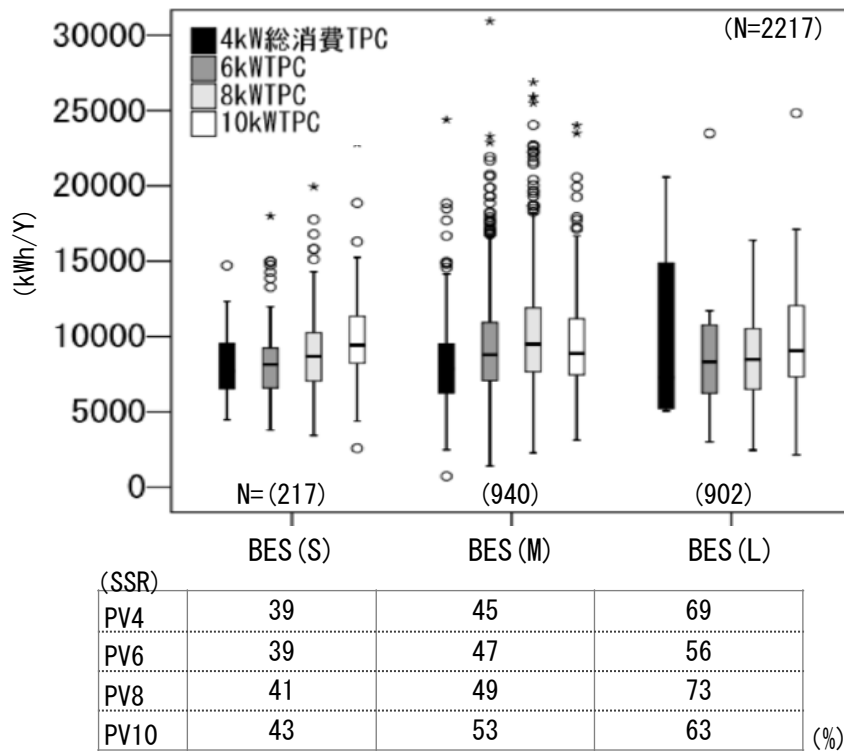


図6.5-5 Annual Total Power Consumption and Self-Sufficiency Rate for Battery Energy Storage

6.6 まとめ

HEMSの大量な実データを整理し、4及び5章までは消費電力の分析を進めた。本章では太陽光発電と蓄電池の容量毎、又総消費電力量毎にエネルギー収支の分析を行なった。PV8以上では年間CO2排出量がマイナスとなっていることがわかる。ZEH政策が進んだ2017年建築の建物などは断熱性能と設備性能両面が向上し、自給率の向上とエネルギー消費量の削減を実現していた。(2017年でZEH基準を満たしている建物は約6割,2016年で4割弱)当然PV容量や蓄電池容量が大きいほど自給率も高まり、PV8~10 kW,BES(L)では67~68 %まで向上しているが、エネルギー消費量の削減が自給率向上の鍵となることがわかった。また、家族人数や延べ床面積、建築年別での自給率分析も行った。家族人数が少なく、延べ床面積も小さいほど自給率は向上していた。建築年が近年になるほど自給率も高く、2017年建築でPV10の場合、自給率は63 %まで向上していた。これらのデータ分析を踏まえて、自給率達成条件の試算を行った。自給率は総消費電力量に大きく影響を受ける。総消費電力量が小さく(~6390 kWh/年)抑えられれば、PV9 kW,蓄電池容量約12 kWhで自給率80 %の達成も可能であることが分かり、改めてPV,蓄電池の大型化に加えてエネルギー消費量の削減が重要であることがわかった。

第7章 太陽光発電と蓄電池及びヒートポンプ給湯機の 消費実態と収支試算

- 7.1 取得データと分析対象
- 7.2 ヒートポンプ式給湯器を活用したエネルギー分析
- 7.3 蓄電池とHPWH併用時の自給率エネルギーバランス

7.1 取得データと分析対象

主な取得データは表3.1-1に示した通りである。静的データとして建築地、建築年、各階床面積、断熱性能、入居者数、家族構成の他に休日、各設備機器の仕様、電力契約コースなどを取得している。動的データとしては、住戸全体と主要設備機器毎のエネルギー消費量、PV発電量、蓄電池充放電量、売買電量、自家消費量を時間別に取得、更に日、月、年別に集計し蓄積している。分析対象は6章と同じで表6.1-4に示した通りである。省エネルギー基準6地域の単世帯、床面積は平均的な100~140m²に絞った。前述しているが、2018年に総務省が行なった「日本土地統計調査」では、日本の戸建て住宅における床面積は平均120m²となっている。PVは平均容量4(3~5),6(5.1~7),8(7.1~9),10(9.1~11)kWに区分(以下PV4,PV6,PV8,PV10)、蓄電池(Battery Energy Storage : BES)は5kWh以下の小容量 (BES(S)),5.1~8kWhの中容量(BES(M))、大容量の8.1kWh以上(BES(L))に分ける。

現在、日本の戸建て住宅における全電化住宅は先述したようにTOU契約であるためHPWHは電力単価の安い深夜に稼働している。(HPWH : 0%)、しかしながらFIT価格の下落やPVの積極的な余剰電力活用が求められる中、蓄電池だけではなくHPWHもPVの余剰電力を活用することが求められてくる。今回HPWHの消費電力50%分を余剰電力で活用する場合の試算を(HPWH : 50%)、さらに100%利用として試算した場合を(HPWH : 100%)として様々なカテゴリーで自給率の試算を行なった。また、蓄電池は深夜時間帯に充電される「深夜充電モード」(Mid Night Mode; MNM)で運用されているため、実充放電データをもとに太陽光発電の余剰電力を優先的に充電する「グリーンモード」に(Green Mode; GRM)時間毎に変換し試算した。後で述べる図6-2.1は各カテゴリーの中央値に最も近い世帯を選出し、上記試算を行った。自給率(Self-Sufficiency Rate 以下SSR)とは消費電力量の内太陽光発電でまかなえた割合を示しており、自家消費電力(充電電力量含む)/総消費電力量(自家消費電力量+買電力量)を時間毎に算出し積算している。住宅のエネルギー政策やスマートハウス普及において重要な指標の一つである。

$$SSR(\%) = \frac{\sum_{n=1}^{8760} [SC(t) + DCE(t)]}{\sum_{n=1}^{8760} TPC(t)} \dots (1)$$

7.2 ヒートポンプ式給湯器を活用したエネルギー分析

図7.2-1は太陽光発電容量別の月間総消費電力量とHPWHの消費電力量を示している。PV容量が大きいほど、総消費量はどの季節でも増加する傾向がある。一方、HPWHの総消費量はPV容量によらずほぼ一定である。HPWHの消費電力量は冬が約250kWh、夏で約50kWhである。

図7.2-2はSB(S)、(M)、(L)の各PV容量の年間総消費電力量とHPWHの消費電力量を示している。総消費量はSBの容量によって大きく変化しない。PV容量が増加するにつれて総消費量も増加し、PV8とPV10の場合は9000kWh近くになる。HPWHではSBとPVの容量による消費電力に大きな変化はなく、1500kWh前後で推移している。

図7.2-3は世帯毎の年間消費電力量とHPWHの消費電力量さらにHPWH0%,50%,100%の場合の自給率を示している。総消費電力量はPV容量が大きくなるほど増加している。また、PV8の時夫婦のみで8,300kWh、単世帯は9,100kWh、二世帯では12,300kWh。PV4,PV6などは自給率が単世帯、二世帯となるほど低下している。PV10は逆にHPWH50%,100%共に自給率は上昇することがわかった。二世帯、PV10SB(L)、HPWH100%では自給率46%にまで達する。

図7.2-4は各床面積の年間総消費及びHPWHの電力量と自給率を示している。床面積に比例して総消費電力量は増加するため自給率は総じて低下していることが分かる。特にPV4,HPWH100%の場合160m²以上で大きく自給率が落ち込み、余剰電力が不足していることが原因と考えられる。180m²以上だとPV8,PV10でも6~9%落ち込んでいる。

図7.2-5は建築年毎の年間総消費量とHPWH消費電力及びPV容量別自給率を示している。建築年が新しくなるにつれて総消費量及びHPWHの消費電力量は削減されていることが分かる。13年のPV6の総消費量は9351kWh、HPWHの消費電力量は1623kWh。2017年の総消費電力量は8418kWh、HPWHは1318kWhでありそれぞれ10%及び19%削減している。それに伴って建築年が新しくなるほど自給率は全体的に上昇している。特にPV10の2017年はHPWHの消費電力も大きいため自給率の伸びが大きくHPWH100%では自給率50%にまで達している。

図7.2-6に太陽光発電容量別の月別HPWH自給率を示す。HPWH0%の場合、最大自給率は7月のPV4kWで34%、PV10kWで43%である。HPWH50%でPV4kWの場合は38%、PV10kWの場合は46%。HPWH100%の場合、PV4kWは42%、PV10kWは4%~50%向上する。HPWH100%の場合、5月に自給率が最大となる。PV4kWは51%、PV10kWは57%に増加する。HPWH0%に比べて16~20%自給率が高くなっている。

図7.2-7に各PV発電量と蓄電池容量ごとでそれぞれHPWH0%,50%,100%の自給率を示した。(蓄電池は全て深夜時間帯で充電するモード) PV8SB(M)の場合、自給率はHPWH0%で25%、HPWH50%で34%、HPWH100%で42%に上昇した。自給率はPV10SB(M)の45%で最も高い。蓄電池が深夜充電のため、容量の違いによって自給率にあまり差が出ていないことがわかる。

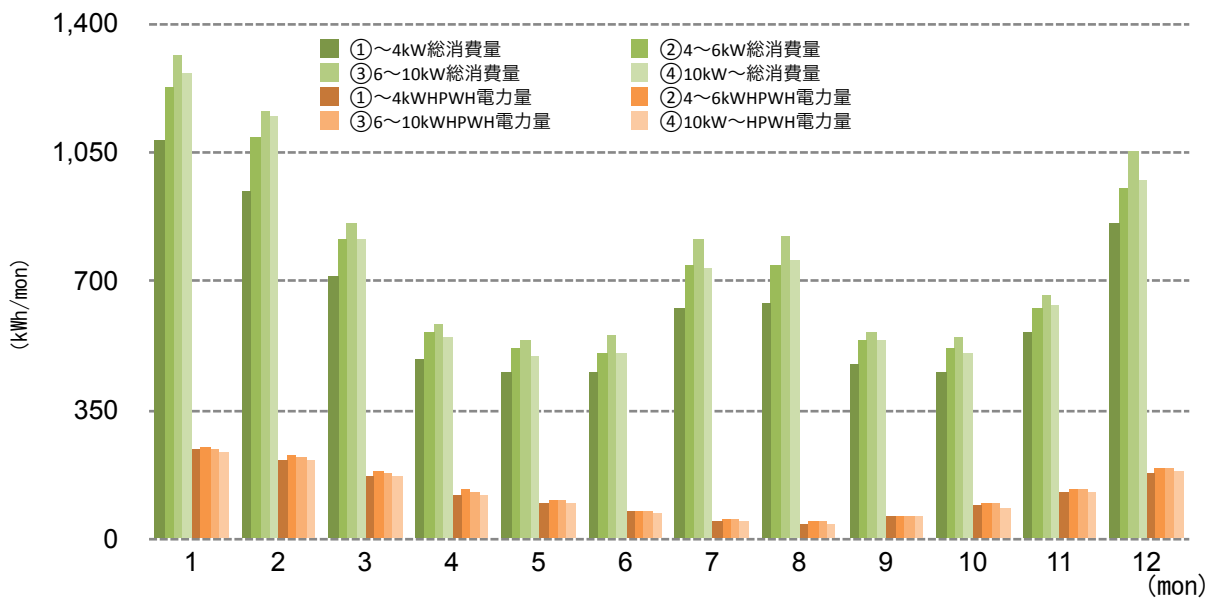


図7.2-1 Monthly total consumption and HPWH consumption of PV

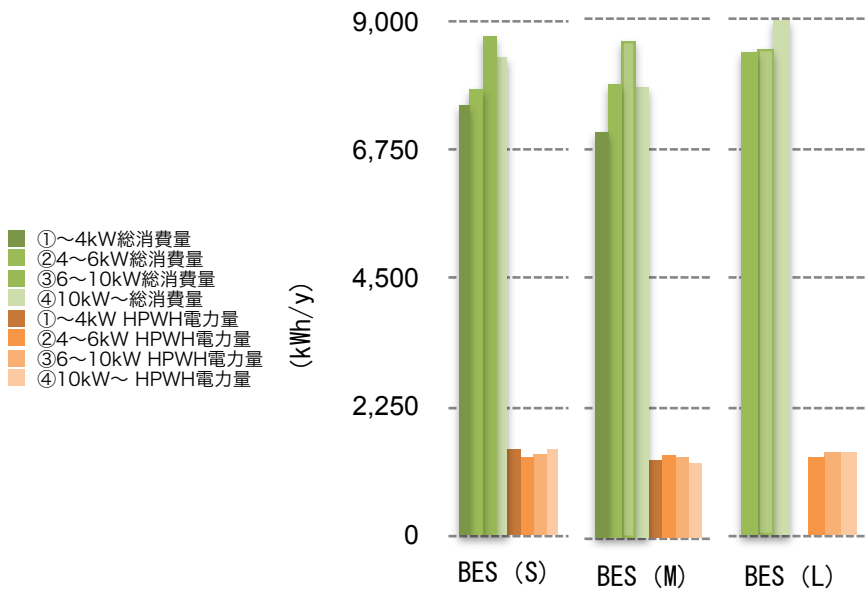


図7.2-2 Annual Total and HPWH consumption of PV

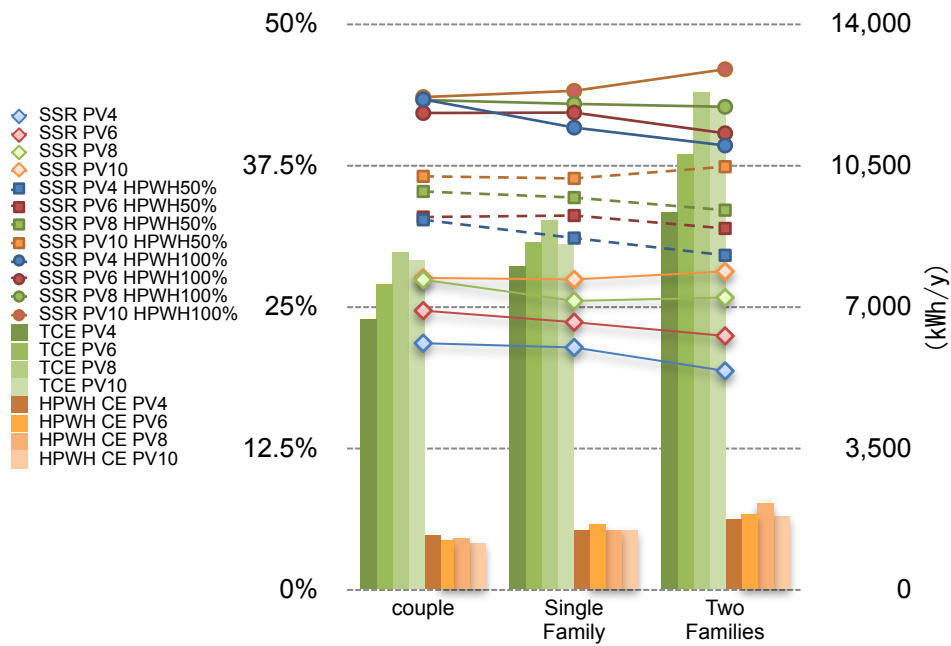


図7.2-3 Annual power consumption of Household and SSR for PV

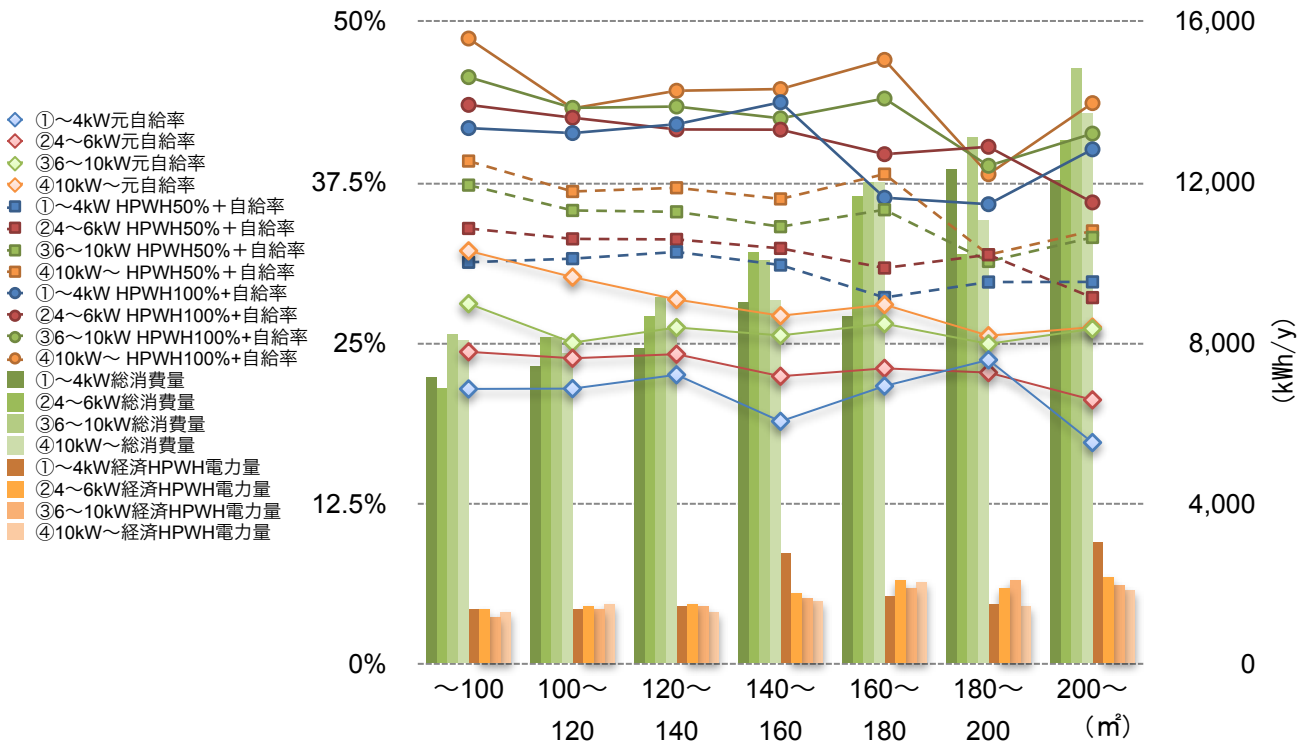


図7.2-4 Annual power consumption and SSR of floor space

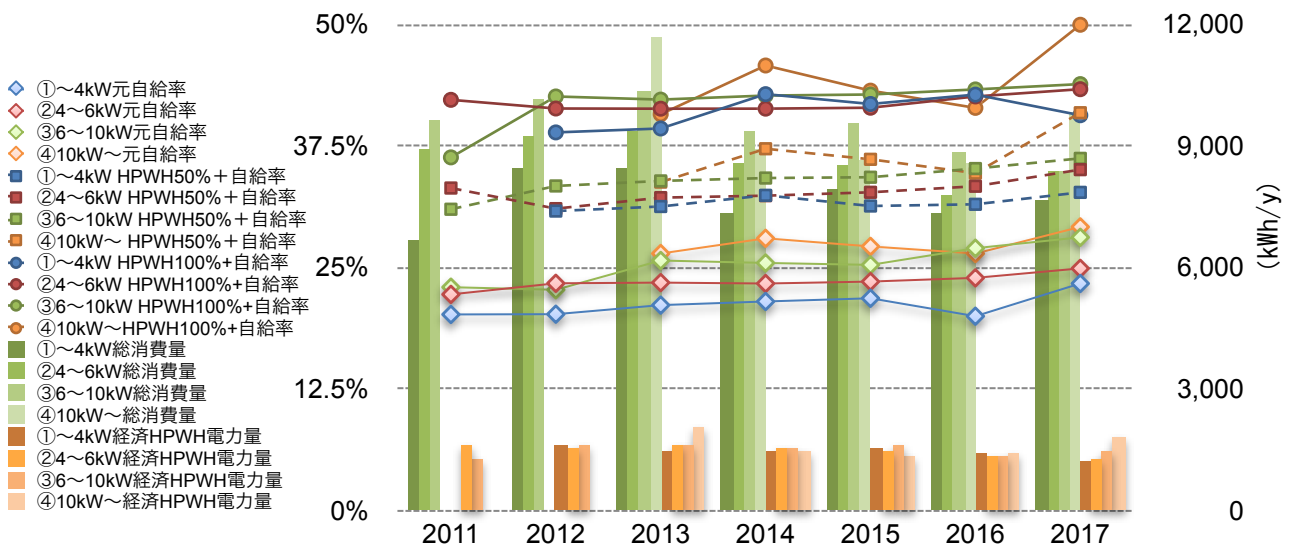


図7.2-5 Annual power consumption and SSR of construction year

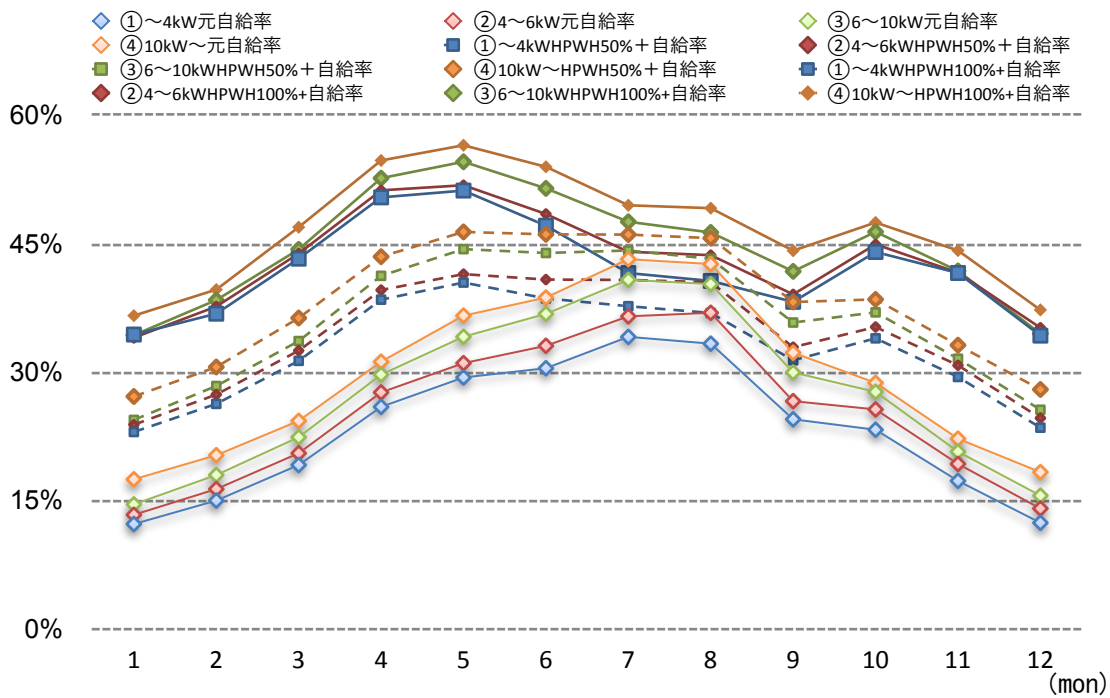
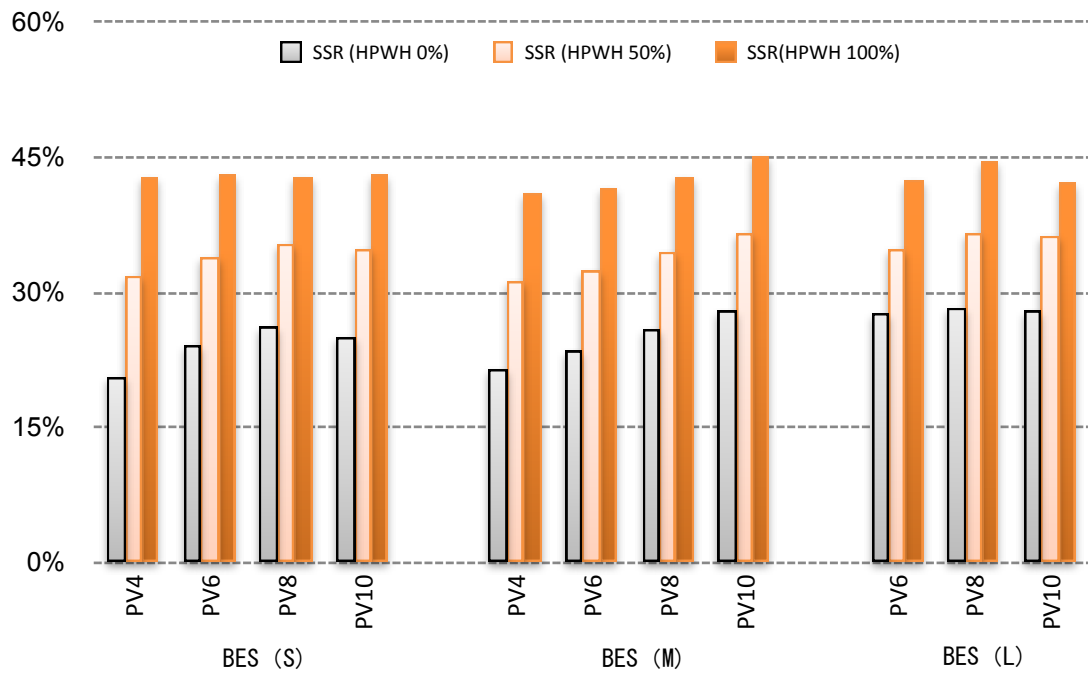


図7.2-6 Monthly SSR of PV for HPWH 50% and 100% green mode



☒ 7.2-7 Annual SSR of PV for HPWH 0%, 50% and 100%

7.3 蓄電池とHPWH併用時の自給率エネルギーバランス

図7.3-1はBES(M)の各カテゴリー別月別自給率(SSR)を示している。深夜モード(MNM)で蓄電池を使用した場合の自給率は夏期が最も高く40%近くまで上昇する。グリーンモード(GRM)で蓄電池のみを運転しHPWHを50%と100%余剰電力活用で運転した場合、自給率は一般に5月が最も高く、次いで10月となる。PV6の場合、5月の深夜モードの蓄電池の自給率は31%、グリーン運転の蓄電池の自給率は54%、グリーン+HPWH50%で73%、グリーン+HPWH100%で84%と、深夜モードに比べて52%も向上している。また、8月はそれぞれ37%、63%、65%、68%であった。HPWHの電力消費量は46kWhで5月の半分以下であるため、HPWHのグリーン運転時の自給率上昇は2~3%に留まる。自給率が最も低い1月の場合、蓄電池GRM+HPWH100%で自給率50%を確保できることが分かった。

図7.3-2は、カテゴリー別の年間自給率をまとめたものである。BES(S),BES(M)と比較して、グリーンモードでのBES(L)の自給率は著しく向上した。PV10の場合、自給率はグリーンモードで65%、グリーンモード+HPWH50%で71%、グリーンモード+HPWH100%で78%まで上昇している。SB(M)ではPV10であっても自給率は最大67%までしか向上しない。PVの容量に関わらず、蓄電池の容量を増やすことが自給率向上に有効であることがわかる。またHPWHをできるだけ昼間運転することが有効であることがわかる。

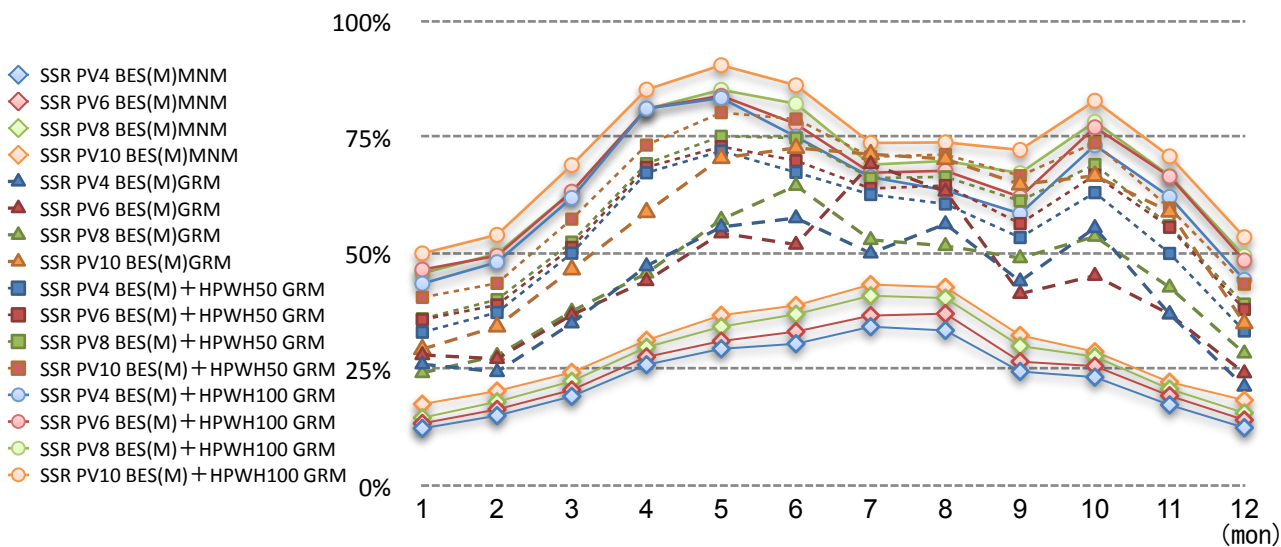


図7.3-1 Monthly SSR of PV and SB and HPWH for BES (M)

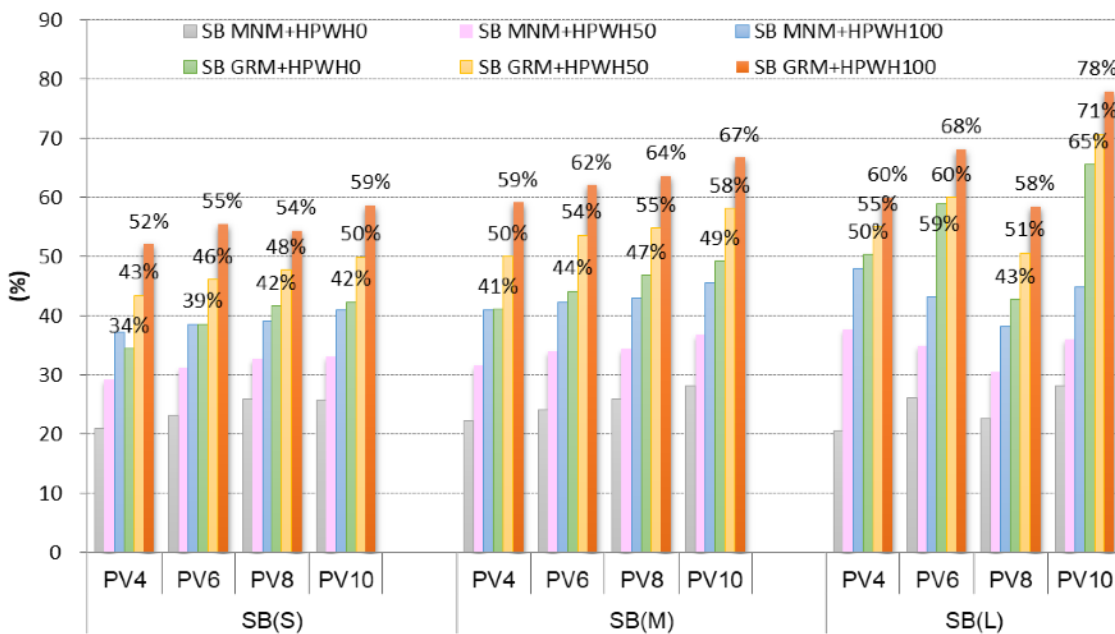


図7.3-2 Annual SSR of BES and HPWH

第8章 HEMSデータを活用した自給自足率モデルと必要条件

- 8.1 自給率達成のための太陽光と蓄電池容量の必要条件試算
- 8.2 ヒートポンプ式給湯器を含む自給率の達成条件
- 8.3 第8章のまとめ

8.1 自給率達成のための太陽光と蓄電池容量の必要条件試算

前章まででは、様々なカテゴリーにおいて消費電力と自給率の関係を分析してきた。自給率はエネルギー消費量や消費形態、PV、BES容量に影響を受けるため、総消費電力量(TPC)を上位25%TPC(L)10618～ kWh/y ,中間TPC(M)6931～10617 kWh/y、下位25% TPC(S)～6930 kWh/yの群に分け、PV,BES,SSRの分布と相関を図8.1-1,-2,-3に示した。ここからもエネルギー消費量が少なければ自給率は向上しやすいことがわかる。(ただしBES(L)の場合はN数が少なくR値が充分でないため今後の課題として更に戸数を増やしていく必要がある)さらに、この回帰式を使ってTPC(S),(M),(L)毎に必要な自給率(SSR)を達成するためのPV,SB容量を図8.1-4,5,6に示した。これは今後、住宅購入検討者がある程度自分のエネルギー消費量を把握している場合に、ある水準の自給率達成要求があるとき、必要なPV及びBES容量を把握するためである。例えばTPC(M)でSSR70 %程度欲しいと考えた場合PV10 kWだと、SBは大凡12 kWh必要となる。TPC(S)でSSR70 %だとPV7 kW,SB9 kWh程度となる。TPCの低減が、自給率を高く保ち、PV,SBの必要量も小さく初期導入コストを抑えられることがわかった。

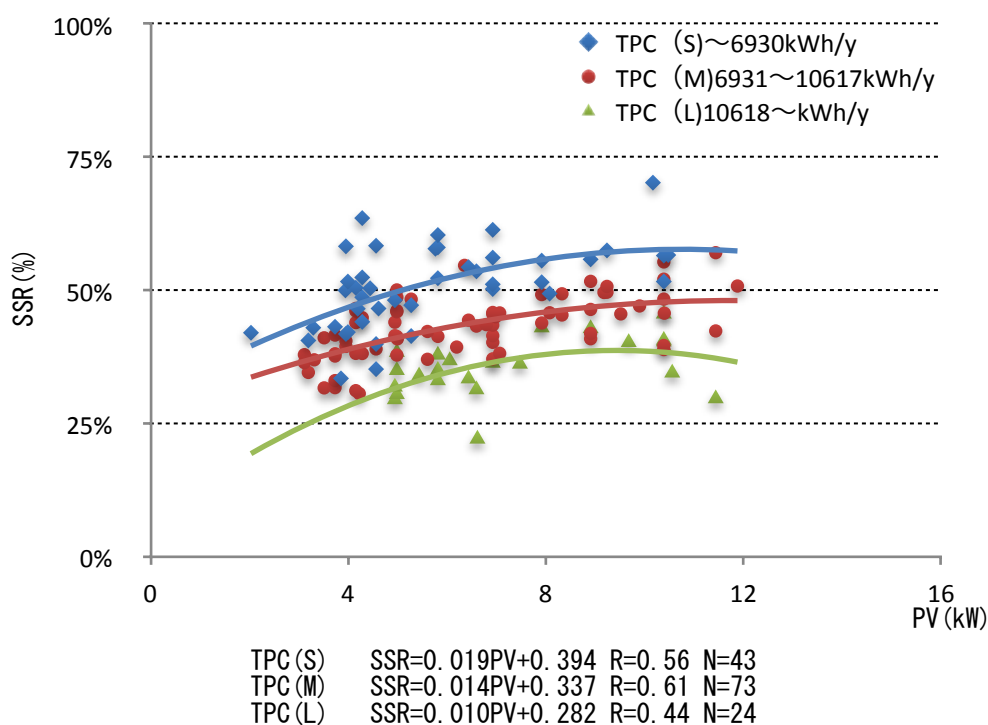


図8.1-1 Total Power Consumption and PV of Self-Sufficiency Rate for Battery Energy Storage(S)

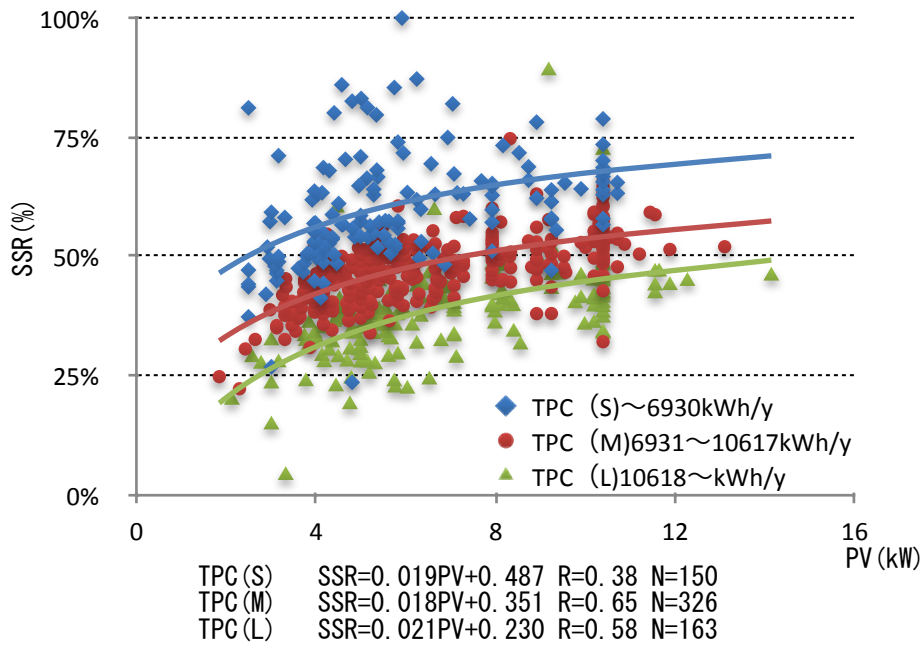


図8.1-2 Total Power Consumption and PV of Self-Sufficiency Rate for Battery Energy Storage (M)

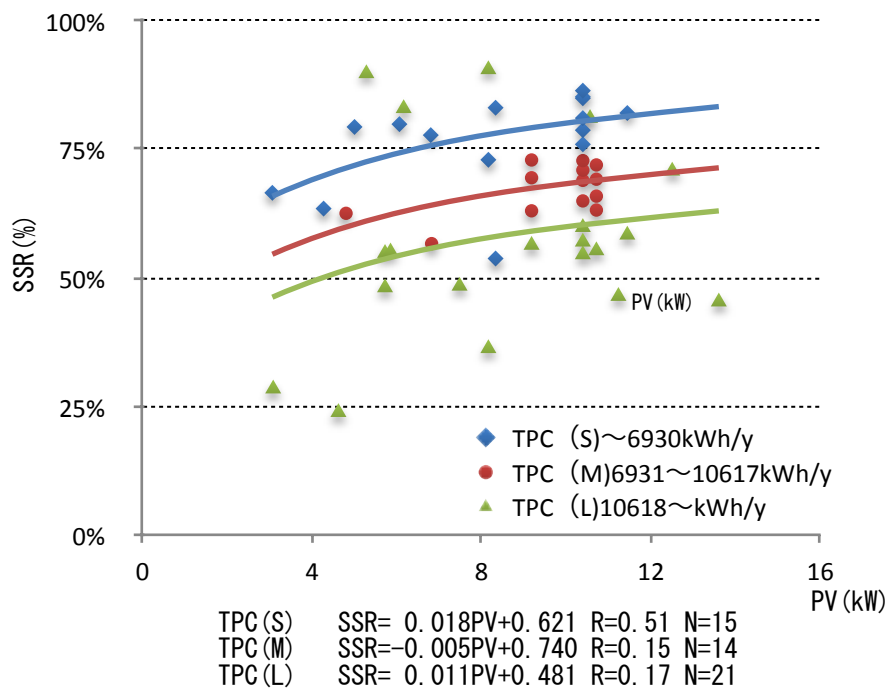


図8.1-3 Total Power Consumption and PV of Self-Sufficiency Rate for Battery Energy Storage (L)

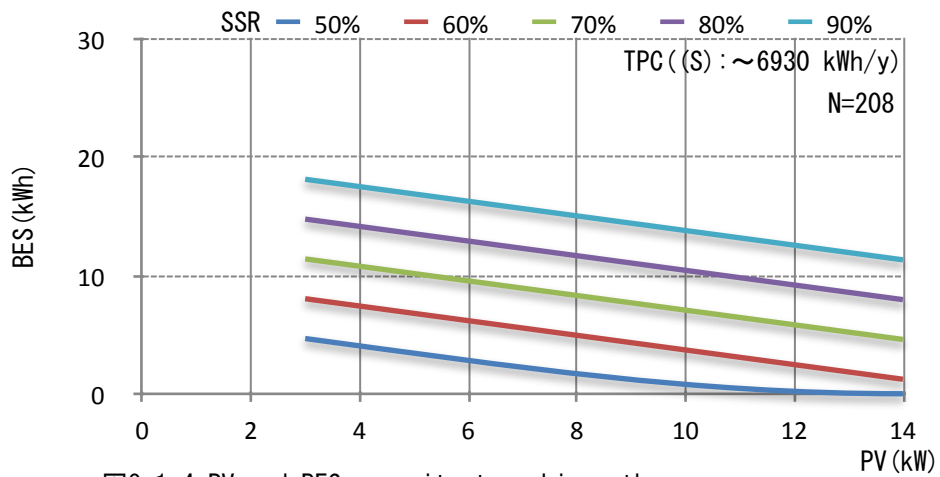


図8.1-4 PV and BES capacity to achieve the required SSR for TPC(S)

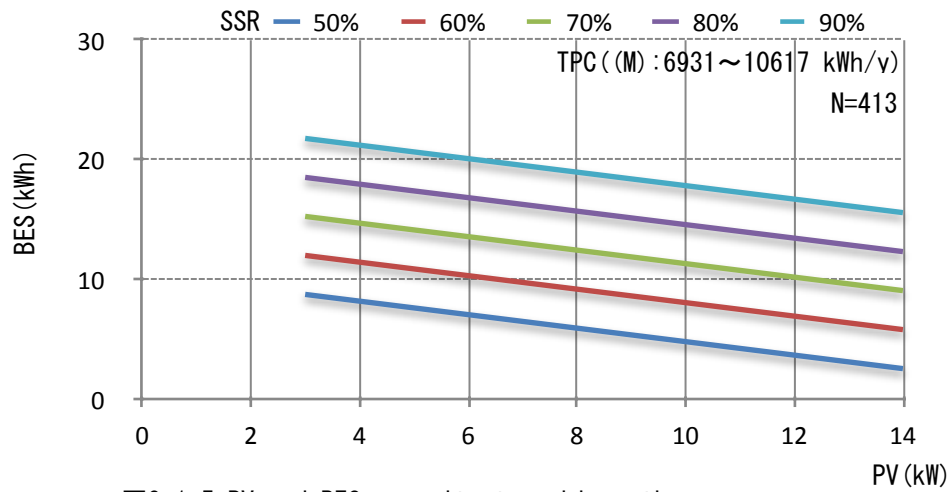


図8.1-5 PV and BES capacity to achieve the required SSR for TPC(M)

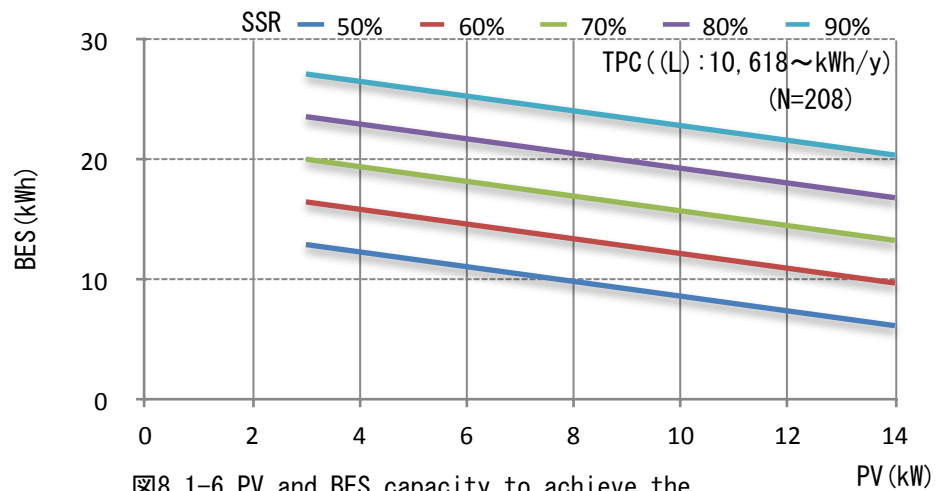


図8.1-6 PV and BES capacity to achieve the required SSR for TPC(L)

8.2 ヒートポンプ式給湯器を含む自給率の達成条件

対数回帰式を用いて蓄電池がグリーンモード(GRM)で運転し、更にHPWHも100%グリーンモードで運転したとき、PVの容量によって自給率がどのように変化するかを試算した。エネルギー総消費量(TCE)は、最少から25%(TCE(S)),中間から25~75%(TCE(M)),最高から75%~(TCE(L))に分類した。

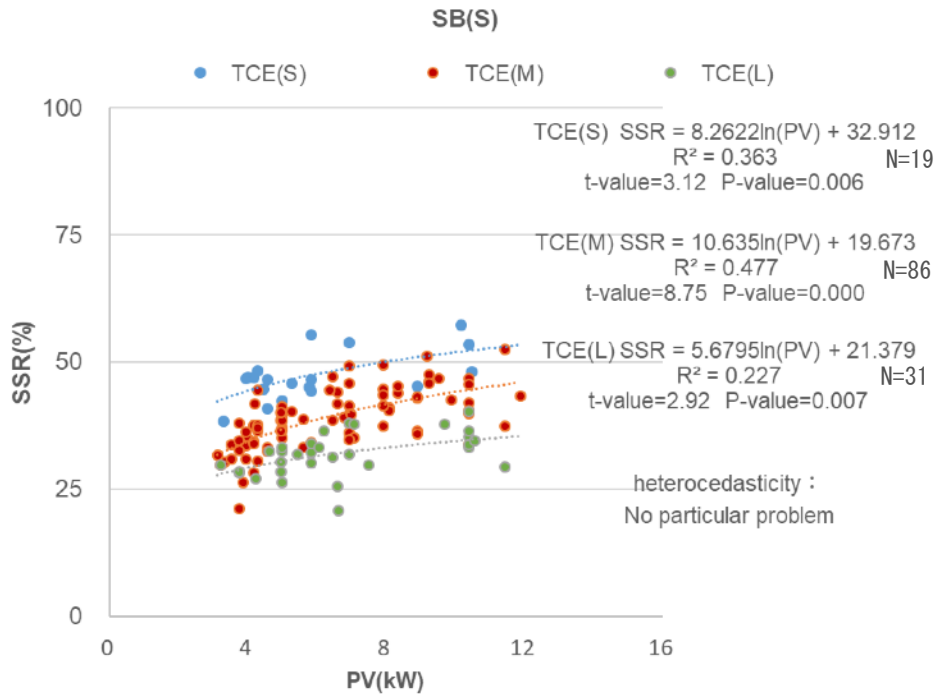
図8.2-1は蓄電池容量が小さい場合(BES(S))である。図8.2-2は、蓄電池容量が中程度の場合(BES(M))を示し、図8.2-3は、蓄電池容量が大きい場合(BES(L))を示している。

まず(TCE(L))において比較を行う。図8.2-1のBES(S)の自給率SSRは、約6kWのPV容量で収束し始め、最大で約35%までしか上昇しない。図8.2-2の(BES(M))の場合も、SSRは約8kWのPVまで上昇し、その後伸びは最大約50%弱までで収束する。図8.2-3の(BES(L))の場合、SSRはPV13kWまで上昇し続け、60%程に達する。PV容量の増加により、BES(S)のSSRは約5%だけ増加したが、BES(L)のSSRは15%近く増加した。

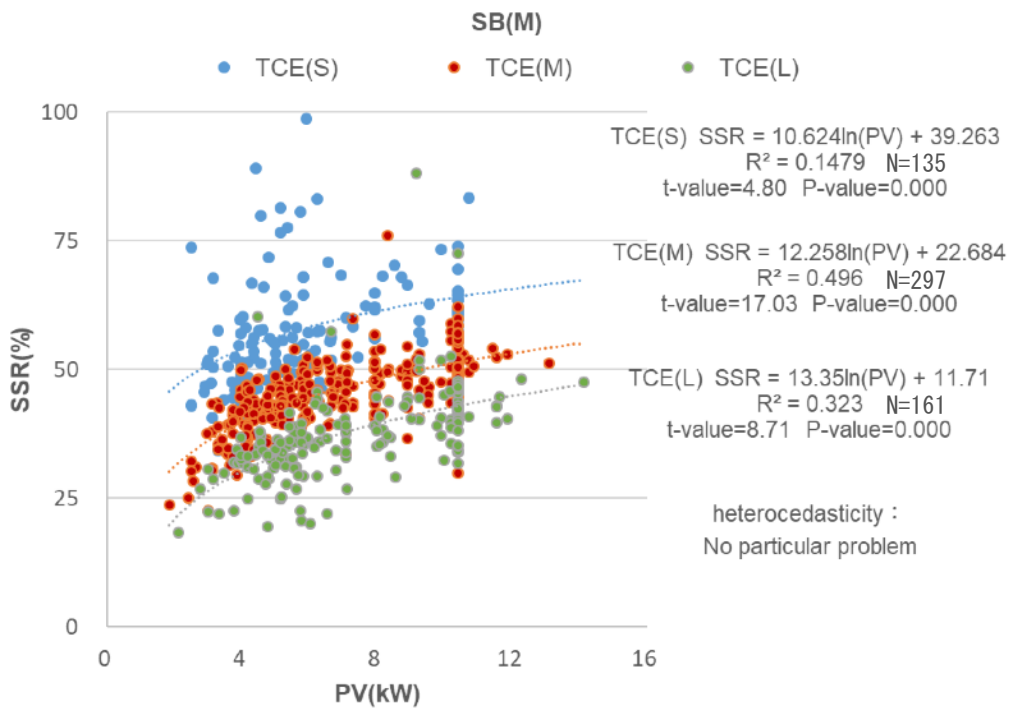
次に、エネルギー総消費量が中間(TCE(M))の場合、図8.2-1のBES(S)の場合、PV8kW付近からSSRは収束し始めるが、TCE(L)と比較して収束は緩やかである。SSRはTCE(L)と比較して約10%高く最大SSRは約45%まで上昇する。図8.2-2において、BES(M)の場合、PVは同じく約8kW付近から収束を開始すると、SSRは約55%まで上昇する。図8.2-3に示したSB(L)の場合、SSRはPV容量の増加により上昇を続け、PV4kWでSSRは50%になり、最大75%近くまで上昇する。PV容量により15%以上SSRが伸びている。

最後に、エネルギー消費量が少ない場合(TCE(S))。図8.2-1:BES(S)の場合、SSRはPV容量6~7kWで収束し始め、最大SSR約55%、伸び約15%である。図8.2-2のBES(M)の場合、収束が遅く、SSRが最大で70%程となる。伸び率は約25%で、SB(M)の中で最も高い。一方、図8.2-3の場合、SSRはPV容量が3kWで既に約60%と高く、PV容量の増大によるSSRの伸び率は15%以上を示している。

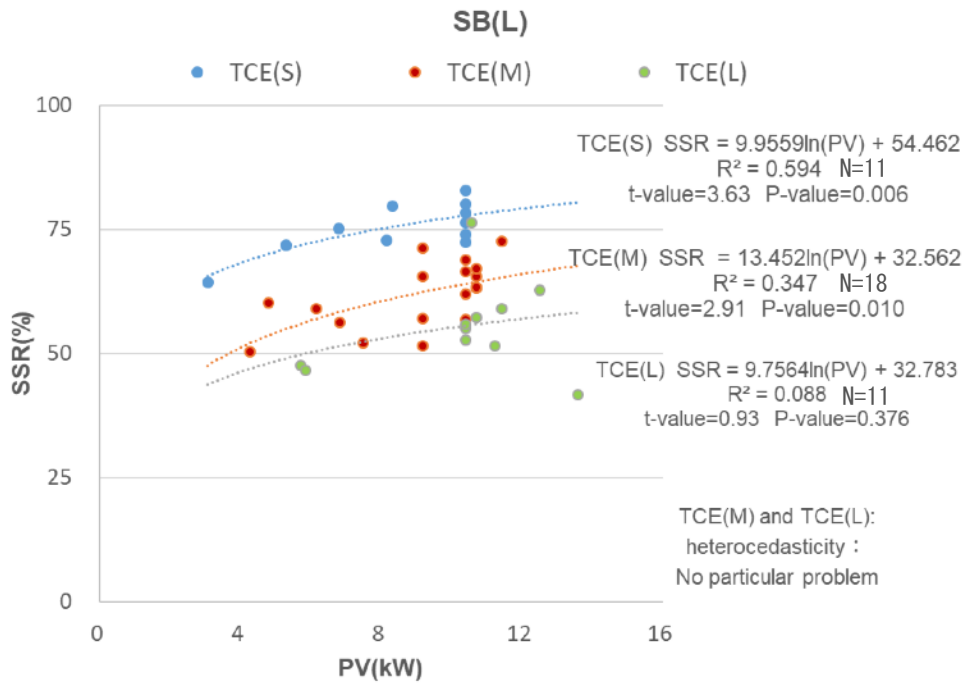
SSRを高く維持する最も効果的な方法は、エネルギー消費量を低く維持し、蓄電池とPV容量のバランスをとることである。また、8.1と比較してもヒートポンプ式給湯器を活用してPVの余剰電力を活用することは自給率の向上に大きく貢献することが分かった用いて蓄電池がグリーンモード(GRM)で運転し、更にHPWHも100%グリーンモードで運転したとき、PVの容量によって自給率がどのように変化するかを試算した。エネルギー総消費量(TPC)は、最少から25%(TPC(S)),中間から25~75%(TPC(M)),最高から75%~(TPC(L))に分類した。



☒8.2-1 Self-Sufficiency Rate(SSR) regression equation for each PV capacity by BES(S) GRM and HPWH100%



☒8.2-2 Self-Sufficiency Rate(SSR) regression equation for each PV capacity by BES(M) GRM and HPWH100%



☒8.2-3 Self-Sufficiency Rate(SSR) regression equation for each PV capacity by BES(L)GRM and HPWH100%

8.3 8章まとめ

数万というHEMSの実データを抽出し前章までは消費電力の分析を進めた。本章ではエネルギー収支の試算と分析をヒートポンプ式給湯機に着目し、太陽光発電の出力、蓄電池の容量、エネルギー消費量毎に分析を行なった。更に床面積や家族人数、空調種類毎にも分析を行なった。表9.1にカテゴリー別の年間CO2削減量(t-CO2/年)を試算した⁴⁾。PV8以上では年間CO2排出量がマイナスとなっていることがわかる。ZEH政策が進んだ2017年建築の建物などは断熱性能と設備性能両面が向上し、自給率の向上とエネルギー消費量の削減を実現していた。(2017年でZEH基準を満たしている建物は約6割,2016年で4割弱)当然PV容量や蓄電池容量が大きいほど自給率も高まるが、エネルギー消費量の削減が自給率向上の鍵となることがわかった。

表9.1 Annual CO2 reduction by category

t-CO2	Photovoltaic(kW.average)			
	4 (3~5)	6 (5.1~7)	8 (7.1~9)	10 (9.1~11)
Battery Energy Storage(kWh)				
Small(4~5)	0.69	-0.3	-0.65	-1.90
Middle(5.1~8)	1.48	1.11	-0.17	-1.97
Large(8.1~12)		0.40	-0.80	-1.48

HEMSデータを用いて、太陽光発電と蓄電池の容量ごとにHPWHを組み合わせた場合の自給率において、HPWHの昼間運転はPV容量にかかわらず自給率を大きく向上させることが分かった。自給率は夏、冬期だけでなく中間期にも大きく向上した。また、蓄電池を組み合わせたとき蓄電池容量を問わず自給率は向上するが特に容量(L)の場合、自給率をさらに向上できることがわかった。また、自給率を上げる最も重要な要素は省エネルギー化である、消費電力が大きいといくら太陽光や蓄電池を大容量化しても自給率の上昇には限界がある。

今後、快適性を向上させながら省エネルギーが進み、蓄電池の大容量化が進めば、低コストで自給率が高い住宅の普及が進むだけでなく、VPP事業や電気自動車との連携も考えられるため、そのような組み合わせによるさらなる分析や研究が必要である。

第9章 結論と今後の展望

- 9.1 これまでのまとめ
- 9.2 今後の展望
- 9.3 謝辞
- 9.4 参考文献

9.1. まとめ

HEMSの大量な実データを整理し、太陽光発電と蓄電池の容量毎、又総消費電力量毎にエネルギー収支の分析を行なった。ZEH政策が進んだ2017年建築の建物などは断熱性能と設備性能両面が向上し、自給率の向上とエネルギー消費量の削減を実現していた。(2017年でZEH基準を満たしている建物は約6割,2016年で4割弱)当然PV容量や蓄電池容量が大きいほど自給率も高まり、PV8~10 kW,BES(L)では67~68 %まで向上しているが、エネルギー消費量の削減が自給率向上の鍵となることがわかった。また、家族人数や延べ床面積、建築年別での自給率分析も行った。家族人数が少なく、延べ床面積も小さいほど自給率は向上していた。建築年が近年になるほど自給率も高く、2017年建築でPV10の場合、自給率は63 %まで向上していた。これらのデータ分析を踏まえて、自給率達成条件の試算を行った。自給率は総消費電力量に大きく影響を受ける。総消費電力量が小さく(~6390 kWh/年)抑えられれば、PV9 kW,蓄電池容量約12 kWhで自給率80 %の達成も可能であることが分かり、改めてPV,蓄電池の大型化に加えてエネルギー消費量の削減が重要であることがわかった。

HEMSデータを活用し全消費電力の約半分を占める換気と家電について分析を進めた。国のトップランナー政策によって家電機器の効率化が着実に進み主要家電の多くが省エネルギーを達成していることが判明した。しかしながら換気、冷蔵庫、TVなどは其々でまだ500kWh/年あり占める割合はまだ多く更なる省エネが求められる。照明のLED化やその他高機能、効率化によって多くの家電で省エネルギー化が進んでいる。

生活スタイルの変化(家族人数の増加もしくは成長)によって食洗機や乾燥機などエネルギーの増加が認められたものもあり、今後建築年別ではなく同一建築年で時系列に分析を進めていく必要がある。また、今回は省エネエリア6地域での単世帯に絞って分析を進めたが、家族構成やエリアの違いによる分析も必要であり今後の課題としたい。

食洗機や比較的最近の浴室乾燥機などは電力料金に合わせて利用されており今後のデマンドレスポンス(DR)等に活用できる可能性がある。今後も快適性を向上させながら省エネ化が進み一部はDRに対応することによって、太陽光発電や蓄電池、エコキュートを最適に組み合わせ、IOTの進化で誰もが使いこなせる自家消費型のスマートハウスがより低価格で供給することができれば日本の住宅分野でのCO₂削減や系統安定、快適性向上につながる。そのためにその他家電としてはまだ500~800kWhほど判明していない使用用途がありその深掘り分析、更にHEMSデータは太陽光発電や蓄電池を組み合わせた分析を進めていくことが必要である。

9.2 今後の展望

今後はPV、蓄電池に加えて、ヒートポンプ式給湯器や全室空調、電気自動車などでPVの余剰電力を積極的に活用するサービスや仕組みが導入されれば、更なる自給率の向上が期待できるであろう。更に設備性能と断熱性能、ZEH率の向上等で省エネルギーが進めば、更なる自給率の向上も期待できると考える。

社会のエネルギー構造が「供給側から需要側」という従来の関係性から再生可能エネルギーを活用した受給一体モデルへと転換していく中で需要側(住宅など)の役割は大きい。また、最近では温暖化の影響もあり自然災害が多発。HEMSで災害時の生活情報を把握したり、停電時に蓄電池が稼働し照明や冷蔵庫などの利用が可能となる事例が多く実証され、スマートハウスの新たな価値も生まれつつある。

今後の研究においては、更にHEMSデータの量が増え、幅が広がり、例えば建築年が古い住宅から最新の住宅、積雪地や寒冷地など様々な地域、多様な家族構成やライフスタイル、居住年毎の分析が可能となり需要側のエネルギー構造が明らかになっていく。そのことによって省エネルギーの促進や系統の安定、機器の最適設計、自家消費モデル型(自給自足型住宅)住宅の有効性を証明し、普及を加速させていくことに貢献したいと考えている

9.3 謝辞

この論文をまとめるにあたり、NTTDATAシステムズの太佐様にはHEMSデータの抽出を行って頂き誠にありがとうございました。膨大なデータの中からの整理を行うことは大変な作業ですが少ない時間で行って頂きました。また、東京大学の岡先生と岩船先生にはデータのまとめ方から、論文の表現方法まで常に正確なアドバイスをいただきました。誠に感謝いたします。さらに積水化学工業株式会社住宅カンパニーの技術スタッフの方々も自給自足の目的や自給率の算定方法など常に最先端かつ良質なアドバイスをいただきました。本当に感謝いたします。最後にここまで論文をまとめられたのは家族の支えがあったからです。本当にありがとうございました。今後も研究を続け、良質な住宅の普及や環境問題の解決に資することができればと考えています。

9.4 参考文献:

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギー白書2020，世界のエネルギー消費量の推移(1965-2018)
- 2) IEA(International Energy Agency)：World Energy Outlook 2019，2019.7
- 3) 経済産業省：再エネ型経済社会の創造に向けて，令和2年自家消費を拡大したZEH+のモデル，第26回電力・ガス基本政策小委員会事務局資料，2020,7
- 4) 石田建一：戸建て住宅のエネルギー消費量，日本建築学会計画系論文集，第62巻，第501号，pp.29-36，1997.11
- 5) 村上周三，坊垣和明，他：全国の住宅80戸を対象としたエネルギー消費量の長期詳細調査 対象住宅の属性と用途別エネルギー消費量，日本建築学会環境系論文集，第71巻，第603号，pp.93-100，2006.5
- 6) 赤林伸一，村上周三，他：全国の住宅80戸を対象とした各種家電機器のエネルギー消費量に関する調査研究，日本建築学会環境系論文集，第72巻，第619号，pp.61-67，2007.9
- 7) 長谷川善明，井上隆：全国規模アンケートによる住宅内エネルギー消費の実態に関する研究 世帯特性の影響と世帯間のばらつきに関する考察 その1，日本建築学会環境系論文集，第69巻，第583号，pp.23-28，2004.9
- 8) 井上隆，水谷傑，他：全国規模アンケートによる住宅内エネルギー消費の実態に関する研究 影響を及ぼす要因に関する分析 その2，日本建築学会環境系論文集，第71巻，第606号，pp.75-80，2006.8
- 9) 清家剛，秋元孝之，他：住宅・建築物省CO2先導事業(住宅)における住まい方及びエネルギー使用に関する実態調査，日本建築学会技術報告集，第22巻，第50号，pp.199-204，2016.2
- 10) 本田智則，工藤 祐揮，他：HEMSデータに基づく住宅電力消費実態と住宅仕様の違いによる省エネ効果の把握，第24回日本エネルギー学会大会講演要旨集，セッションID:6-2-4，2015.7
- 11) 小林和幸，濱中香也子，他：HEMS情報を活用したエコキュートの効率的な運転制御手法の検討，平成27年度空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集，第1巻，給排水・衛生編，セッションID:A-15，2017.11(公開)
- 12) 遠藤 裕太，須永 修通、他：全電化戸建住宅における世帯特性に応じた省エネルギー行動の提案に関する研究,日本建築学会環境系論文集，第80巻，第715号，2015.9

-
- 13) 中島 光太, 本藤 祐樹, 他: 家庭内のコミュニケーションが日常生活の省エネルギー行動に与える影響, 日本エネルギー学会誌, 第98巻, 第1号, pp.1-8, 2019.01
- 14) 山口雅英, 伊賀淳, 他: 住宅用太陽光発電・蓄電池組み合わせシステムのメリットに関する研究, 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), 第123巻, 第3号, pp.402-411, 2004.03
- 15) 西野義彦: 住宅用太陽光発電の経済性評価, 電力中央研究所経済研究所[編], No.22, pp.05-20, 1987.01
- 16) 中島 彰栄, 長野克則, 他: ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究 (その1) スマートハウスにおける太陽光発電連携型リチウムイオン蓄電池の充放電の最適化に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会(高知)学術講演論文集, 第9巻, セッションID:E-9, pp.37-40, 2017.09
- 17) 村上友章, 長野克則, 他: ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究 (その2) スマートハウスにおけるエネルギー需給システム運用最適化の検討, 空気調和・衛生工学会大会(高知)学術講演論文集, 第9巻, セッションID:E-10, pp.41-44, 2017.09
- 18) 遠藤浩輝, 横山 晋也: 蓄電池併設型太陽光発電システムの防災住宅への適用, パワーエレクトロニクス学会誌, 第31巻, No.14, pp.109-115, 2006.03
- 19) Pradita, O, Hadi, and Goro Fujita.: DESIGNING HYBRID SYSTEM OF PV-BATTERY BASED ON ENERGY INDEPENDENCE LEVEL, SEATUC Journal of Science and Engineering, Vol.1, Issue 1, pp.31-37, (accessed 2020.2.18), DOI: https://doi.org/10.34436/sjse.1.1_31
- 20) Filomeno, M, Vieira, and Pedro, S, Moura, et al.: Energy storage system for self-consumption of photovoltaic energy in residential zero energy buildings, Renewable Energy, vol.103, pp.308-320, (accessed 2016.11.28), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.048>
- 21) Rasmus Luthander, and Joakim Widen, and Joakim Munkhammar, et al.: Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaics using storage and curtailment, Energy, vol.112, pp.221-231, (accessed 2016.8.5), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.039>
- 22) Rasmus Luthander, Joakim Widén, Daniel Nilsson, et al.: Photovoltaic self-consumption in buildings, Applied Energy, vol.142, pp.80-94, (accessed 2015.1.12), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>
- 23) Matthew, D, Leonard, and Efstathios, E, Michaelides, et al.: Grid-independent residential buildings with renewable energy sources, Energy, vol.148, pp.448-460, (accessed 2018.2.3), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.168>
- 24) Mohammad Sameti, And Alibakhsh Kasaeian, et al.: Simulation of a ZEB Electrical Balance with a Hybrid Small Wind/PV, Sustainable Energy, Vol.2, No.1, pp.5-11, 2014.01, DOI: [10.12691/rse-2-1-2](https://doi.org/10.12691/rse-2-1-2)
-

25)Juman Al-Saqlawi.and Kaveh Madani.and Niall Mac Dowell.:Techno-economic feasibility of grid-independent residential roof-top solar PV systems in Muscat, Energy Conversion and Management , vol.178, pp.322-334, (accessed 2018.10.18) , DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.021>

26) 一般財団法人 家電製品協会：家電産業ハンドブック，2019

27) 石田 健一，佐藤 誠：HEMSによる家庭用冷暖房・照明エネルギーの削減効果の検証，日本建築学会環境系論文集，第70巻，第595号，pp.57-64，2005.9

28) 中山 巧，小林 和幸，他：太陽光発電電力の自家消費拡大に資するHEMSの活用，空気調和・衛生工学会大会(大阪)学術講演論文集，第9巻，セッション ID:D-63，pp.137-140，2015.09

29) 八木田克英，岩船由美子，他：見える化 HEMS の閲覧行動とコミュニケーション効果，エネルギー・資源学会論文誌，第35巻，第4号，pp.50-58，2014.6

30) 経済産業省 資源エネルギー庁：総合エネルギー統計，令和元年度エネルギー受給実績（速報），2020,11,18

31) 総務省統計局：平成30年住宅・土地統計調査，住宅及び世帯に関する基本集計，結果の概要，pp.5，2020.9.30

32) 磐田朋子：家庭のエネルギーデータの活用状況と今後の活用に向けた課題，日本LCA学会誌，第15巻，第3号，pp.258-265，2019.7

33) 萩野 登司，峰野 悟，他：LCCM住宅における家庭用蓄電池・太陽光発電設備一体型システムの特性把握研究，空気調和・衛生工学会学術講演論文集，第10巻，セッションID:F-53，pp.65-68，2017.09

34) 土本 直秀，坂本 忠昭：PV・EV連携パワーコンディショナ，電気設備学会誌，第33巻，No.10，pp.767-770，2013.10

35) 伊賀 淳，山口 雅英，他：住宅用太陽光発電・蓄電池組み合わせシステムのメリットに関する研究(2) 負荷パターンおよび地域差による影響の検討，電気学会論文誌B，第124巻，10号，pp.1224-1230，2005.01

36) 電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用) -平成30年度実績-，環境省・経済産業省，2020年1月，一般配送電気事業者の基礎排出係数：0.000462(t-CO₂/kWh)

37) 太田真人,大岡龍三,他:戸建て住宅におけるHEMSデータを活用したエネルギー利用実態の分析(その1) 建築年別及び用途別消費エネルギー分析,日本建築学会環境系論文集, 第85巻, 第772号, pp.495-502, 2020.06

38) 太田真人,大岡龍三,他:戸建て住宅におけるHEMSデータを活用したエネルギー利用実態の分析(その2) 建築年別の家電・換気消費エネルギー分析,日本建築学会環境系論文集, 第85巻, 第775号, pp. 677-683, 2020.09

39) Oota , M. and Ooka,R. Et al. : Estimation of Self-Sufficiency Rate in Detached Houses Using Home Energy Management System Data , *Energies* 2021 , 14(4) , 975, DOI ; <https://doi.org/10.3390/en14040975>