

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

建物と輸送エネルギーシステムのスマート 統合がもたらす地域民生部門炭素排出削減 の定量評価

令和 2 年 3 月

An Empirical Study of Regional Carbon Emission Reduction Potentials
by a Smart Integration of Buildings and Mobility Energy Systems

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2019-PP-19

概要

日本政府は、パリ協定を受けて2030年に向け温室効果ガス排出量についてCO₂換算26%削減(2013年比)を約束し、2050年には80%削減さらにはゼロエミッション化を目指している。そのなかで輸送部門と民生部門の排出削減においては、戸建住宅のZEH(Zero Energy Houses)化、業務用建物ZEB(Zero Energy Buildings)化や、電気自動車(EV)と太陽電池(PV)との連携に期待が寄せられている。エネルギー需要の電力化はこれらの普及と拡大の大きな要素であるが、それらは同時に電源構成などエネルギー供給構造にも大きく影響すると考えられる。しかし、これらの効果の定量的解析はこれまでなされていない。

ここでは、建物のZEB/ZEH化、太陽電池(PV)の普及、電気自動車(EV)による在来型エンジン自動車の置き換えによる民生部門と輸送部門の融合によるCO₂排出量の削減潜在性に着目する。本提案では、これを①分析のフレーム、②住宅のZEH化、PV導入によるエネルギー供給およびCO₂排出の地域別変化、③乗用車利用状況を反映した住宅用エネルギー需要とガソリン車のEV置き換えによるCO₂排出の変化、④住宅と業務部門およびPV、EVの連携によるCO₂排出変化の予備的検討、⑤業務部門のZEB化の現状、⑥既存のスマートシティプロジェクトの調査、の6段階で行う。

まず地域エネルギーシステムのあり方とエネルギー需要の評価手順を示す。続いて、家庭部門の電化、ZEH化によるエネルギー需要変化と低炭素化の効果を地域別に評価する。この結果に東京理科大学で行われた自動車利用状況アンケート調査を適用し、住宅とEV/PVの連携による家庭部門の低炭素化の評価を行う。これによると、まず住宅の全電化とEV導入の効果は戸建て住宅、集合住宅いずれも約30%のCO₂排出削減を示した。もし家庭に年間一次エネルギー消費と等しいだけのPVが設置され、かつ余剰電力がすべて系統電力に0排出電源として接続されて既存電源を置き換え、さらにEVがガソリン自動車を置き換えるとするなら、現状と比較し戸建て住宅で87.3%~96.7%、集合住宅では71.5%~94.8%のCO₂排出削減が可能となる。

上記を今後PV運用とEVの連携および需要家間の連携評価に拡張するため、予備的検討として宇都宮市7地域を取り上げ、既開発の地域エネルギーモデルを拡張適用して、地域内の住宅とオフィスや店舗とのエネルギー供給の連携やEV化効果の時刻別評価分析を行った。この結果、建物断熱化やEV導入、需要家間相互融通などを全て導入し費用最小化を行うと地域の年間CO₂排出量は従来型システムの約35%に削減された。コストとCO₂排出削減のトレードオフ評価では、PVと蓄電池の導入化によるエネルギーコストの8%増加に対し、CO₂排出は30%にまで追加削減なされた。この場合託送料金に対する感度が特に高いことが示された。またEV充電の広域マネジメントシステムの必要性も示唆された。

次にZEBの現状を調査した。ZEB認定は13件のみであるが、もし2020年からすべての新築建物がZEB化され、建物寿命を50年とすると、全建物ストックに占めるシェアは2030年で18.6%、2050年は52.0%になると推計される。業務用ビルの電力使用原単位の変化を関東の中規模ホテルについて2001年推計値を2012~2014年調査と比較すると、新しい建物の原単位データは約21%省エネ化が進んでいることが示された。

最後に、スマートシティの現状を調査した。消費者への情報フィードバックなどSmart化による地域エネルギーへの期待は大きいが実装の効果はまだ明らかでない。そこでまず、次世代・エネルギー社会システム実証事業のスマートシティプロジェクト(横浜市、豊田市、けいはんな、北九州市)の報告書を調査した。各プロジェクトは重点分野が異なるため相互比較は難しいものの、需要家応答(DR)の効果はいずれも30%程度のエネルギー消費削減になるとしていた。

以上からZEB/ZEH、PV、EV化の連携効果は大きいこと、託送料金の設定、EV充電の広域的管理の必要性、特に導入推進策の重要性などの課題も同時に示された。

Summary

In response to the Paris Agreement, Japan has pledged a 26% reduction in carbon emissions from its 2013 levels by 2030, and aims to reduce emissions by 80% by 2050 as it strives towards zero-emissions. As carbon emission reduction options in the building and transportation sectors, ZEH (Zero Energy Houses), and ZEB (Zero Energy Buildings) equipped with photovoltaics (PV), and the dissemination and integration of electric vehicles (EV) are expected to make major contributions. The electrification and changes in energy demand structure will affect energy supply structures, especially the power generation mix. The quantitative evaluations of these new systems, however, have not been well investigated.

This report quantitatively evaluates the potential energy demand changes and CO₂ emission reductions in the buildings and vehicles of households brought by the integration of energy supply-demand systems including ZEH/ZEB technologies, PV installation and EVs taking into account regional variation. This evaluation consists of 6 steps: 1. Overview of the assessment, 2. Regional assessments of PV and heat insulation effects in the residential sector, 3. Integration of residential energy systems and EV adoption, 4. Preliminary assessment of interlinkages among residential building, other buildings and EVs, 5. The current status of ZEB and review of Smart City projects.

First, we show the outline of the energy demand structure and also the evaluation procedure.

Second, we conduct a per-region evaluation of the changes in the energy demand and CO₂ emissions of the residential sector by implementing efficient heat pumps (HP) and ZEH building designs. Third, the effects of EV replacement are evaluated based on the survey reflecting the regional differences in driving patterns. The results show that the high-efficiency energy facilities and EVs would reduce CO₂ emission by around 30% and that ZEH/ZEH-M with sufficient PV provide a 87.3%~96.7% reduction in CO₂ emissions for detached houses and a 71.5%~94.8% for apartment houses, provided all excess PV output is fully supplied to power utilities and substitutes existing power generation.

Fourth, we further perform preliminary simulation of cost minimization in regional energy models to see the hourly effects of the integration of utility, PV and the demand for EV charging. The results show 35% reductions in CO₂ emissions compared to the conventional system along with cost minimization. Trade-off simulation between cost and CO₂ emission suggests that 8% additional cost provides additional 5 points CO₂ emission reduction by increased PV and battery capacity.

Fifth, we review the current status of ZEB based on the literature. Even if all new buildings are converted to ZEBs from 2020, their share in the total building stock in Japan will be 18.6% by 2030 and 52.0% by 2050 assuming a 50 year lifetime for commercial buildings, whereas only 13 “ZEB” buildings are registered currently. We compare the current data with an existing study performed in 2001, suggesting that new buildings achieve around 21% energy conservation.

Sixth, “Smart City” which includes feedback from producers to consumers via ICT is often seen as a vision of the future. Because empirical studies have not been performed, we reviewed the reports of Initiatives for Establishing Smart Communities conducted by METI. While the purpose and structure differ from project to project, it was shown that Demand-Response systems can reduce energy consumption by approximately 30% based on case studies.

As a whole, the current study shows that the integration of ZEH/ZEB, PV and EVs offers a large potential reduction of CO₂ emissions, but the setting of power purchase prices, promotion of ZEH/ZEB and the need for the development of regional management systems of EV charging are essential. The integration of this study with power generation planning and the potential of other regional renewable energy sources is a topic for further study.

目次

概要

1. 本研究の位置づけと背景.....	1
2. 地域民生部門低炭素化のビジョンと定量的評価手順.....	2
2.1 地域低炭素化のビジョン.....	2
2.2 地域民生部門低炭素化の定量的評価手順.....	10
3. 家庭部門におけるエネルギー需要変化の推計.....	11
3.1 背景と概要.....	11
3.2 ZEH・ZEH-Mにおけるエネルギー消費量の推計.....	11
3.3 将来世帯数推計に伴うCO ₂ 削減の可能性.....	13
4. 家庭用エネルギーとEVの連携によるCO ₂ 排出削減の地域別評価.....	15
4.1 家庭と電気自動車との連携評価.....	15
4.2 既存統計と自動車利用アンケート調査に基づく自動車走行需要の推計.....	15
4.3 宇都宮市7地域における地域の家庭・業務用建物とEVの時刻別導入効果の予備的分析.....	20
5. ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビルディング）の状況と普及率について.....	27
5.1 ZEBの状況.....	27
5.2 業務用建物エネルギー原単位と床面積の地域差.....	28
5.3 ZEBの将来普及率に関する考察.....	29
6. 低炭素社会のまちづくりのための地域のスマートシティ成果レビュー.....	35
6.1 横浜スマートシティプロジェクト.....	35
6.2 愛知県豊田市における『家庭・コミュニティ型』低炭素都市構築実証プロジェクト.....	35
6.3 けいはんなエコシティ次世代エネルギー・社会システム実証プロジェクト.....	35
6.4 北九州スマートコミュニティ創造事業.....	35
6.5 スマートシティにおけるエネルギー連携に関する考察.....	36
7. 結論と今後の展望.....	38
8. 政策立案のための提案.....	39
付録1 建物の寿命と残存率に関するモデル化.....	40
付録2 ZEB参照データ.....	42
付録3 スマートシティの成果ー4地域実証事業報告書から得られた知見ー.....	44
参考文献.....	50

1. 本研究の位置づけと背景

気候変動リスクに関する科学的知見が進むにつれ、目標とすべき温度上昇制約は近年厳しさを増す傾向にある。実際、パリ協定では今世紀末までの 2°C 上昇の制約と、さらに究極の目標として 1.5°C 目標が謳われた。IPCC 第 5 次評価報告書をはじめとする既往の超長期モデル研究は、このような厳しい温度上昇制約の実現には、温暖化ガス排出を 0 に近づけるだけでなく、さらに BECCS など「負の排出」オプションが必要となると指摘してきた。いうまでもなく、このようなオプションは大きなコストを必要とする。これに対し、SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5°C[1] や IIASA-LED シナリオ[2]は、抜本的なイノベーションによるエネルギー需要削減を行えば、ネガティブエミッションオプションの導入を回避しても 1.5°C 目標を達成する可能性を示した。日本を対象とした低炭素社会戦略センター (LCS) の電源評価モデル研究[3]においても、電力需要が上昇すると二酸化炭素排出の 2050 年 80%削減時の追加費用が急激に上昇することが示されている。このようにエネルギー需要削減は低炭素社会実現の負担を下げる重要な要素の一つとなっている。

今後の日本社会のエネルギー需要を予測するには、まず社会経済シナリオが必要となる。これまでに国内の各機関でもいくつかの「2050 年シナリオ」が開発されてきたが、これらはマクロな人口、経済、エネルギー需要が主であり、地域差、特に都市や郊外、村落部についての記述は少なく、定量的な予測には至っていない。他方、革新的な将来社会の姿としての Society5.0 によるスーパーシティ、スマートシティ、スマートタウン、スマートグリッドなどは明るく豊かな低炭素社会構築に大きく貢献すると期待されているが、その効果を定量的に議論するためには、まず地域エネルギー需給の 2050 年シナリオが必要になる。さらに、太陽電池 (PV) の急速な価格低下と相俟って、民生用建物の大幅な省エネ化を実現する ZEH/ZEB や、電気自動車 (EV) による乗用車部門の低炭素化、そして両者の連携も現実的なものとなりつつある。

以上の背景のもとに、本提案書は、建物と輸送エネルギーシステムのスマート統合がもたらす地域民生部門炭素排出削減の定量評価を行い、これをスマート化された地域エネルギー需給システムに基づく 2050 年低炭素社会ビジョン構築のための第 1 段階と位置付ける。

これまで LCS では、家庭部門の電力見える化実験[4]や電気代そのまま払い[5]等の様々なアプローチで民生部門の省エネルギー化、低炭素化の可能性を示し、民生家庭部門における CO₂ 排出量の中長期予測モデル構築に向けた検討[6]では、日本全体における CO₂ 排出量の定量的評価を行ってきた。しかし、地域差を明示的に考慮し、次いで全国レベルに広げる評価は、データ整備上の制約のため行われていない。

これに対し、近年、環境省の家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査[7]により地域別エネルギー消費量/(世帯・月)のアンケート調査データが利用可能になり、(一社)環境共創イニシアチブの BEMS 公開データ[8]により業種別の時間当たりエネルギー消費量の実測値も一部把握できるようになった。家庭用自動車用エネルギーの地域差についても、上記家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査や全国自動車利用 Web アンケート調査 (東京理科大学) [9]が利用可能となった。本提案書では、それらを用い、家庭部門エネルギー消費量、運輸エネルギー消費量の地域別評価、および業務部門における ZEB 普及の現状、スマートシティについての調査結果を示し、CO₂ 排出削減の可能性を定量的に評価する。

これら結果は地域開発のビジョンにつながるものであると同時に、LCS で開発済みの電源評価モデル[3]に接続可能となる。

2. 地域民生部門低炭素化のビジョンと定量的評価手順

2.1 地域低炭素化のビジョン

我が国の低炭素化シナリオ策定は、現在進行中のものを含め、これまで様々な機関が取り組んできた。例として経済産業省（2015）「長期エネルギー需給見通し」[10]、環境省（2018）「長期大幅削減に向けた基本的考え方」[11]、国立環境研究所他（2008）「低炭素社会に向けた12の方策」[12]、小宮山・山田（2016）「新ビジョン2050」[13]、をあげることができる。従来、まず大規模排出源である発電部門や産業部門の省エネ化技術、輸送部門の高効率化技術に焦点が当てられ、再生可能エネルギーの導入可能性や炭素回収貯蔵技術（CCS）、水素エネルギー利用などの技術ポテンシャル評価が定量的になされてきた。家庭や業務用の民生部門でも断熱化、ヒートポンプ（HP）、コジェネレーション（CGS）などの技術開発が主であった。

このような低炭素化さらにはゼロエミッション化を実現する機器や技術など、供給サイドの開発シナリオが今後も温暖化対策の重要な要素であり続けることに疑いの余地はないが、同時に、需要側の対応にも注目が集まる傾向がある。例えば、Gruebler et.al.（2018）[14]は、破壊的イノベーションでエネルギー需要を大幅に低減させればBECCSなどの吸収オプションなしでも1.5°C目標が達成可能であることを示した。これは、情報技術の急速な進展により、従来の延長としての単なる個別プロセスの効率化だけでなく、『財の所有』から『利用の便益』が満たされればよいとする価値観の転換により不便さを感じさせないまま物質的消費を大幅に減らせる」と主張している。社会の発展経路を従来の延長から大きく転換させるイノベーションへの期待は、我が国のSociety5.0をはじめ産業構造審議会の活動でも強調されている[15]。

産業やエネルギー転換部門のような大規模な対策、さらにイノベーションのような社会全体を巻き込む構造変化と同時に、特に日本では少子高齢化傾向の下で「地方の自立と創生」をどのようにエネルギー・環境問題と両立させる策を打ち出すかは緊急の課題である。国立環境研究所（2008）[12]はコンパクトシティを志向する都市集中型のAシナリオと、地方分散志向のBシナリオを示した。小宮山・山田（2016）[13]が提唱したプラチナ社会では、大規模産業の技術的緩和の方向性と同時に再生可能エネルギーの大幅導入による地域の活性化が提唱され、また多くの市町村の活動が紹介されている。柏木（2018）[16]も同じく「エネルギーの地産地消による地方創生」のビジョンを打ち出した。太陽電池推進のFIT導入と再エネの価格低下、電力販売の自由化や新たな市場の創設、情報技術の進展、EVの増加から自動運転の実現など、要素技術、制度、インフラとともに新しいエネルギー社会が展望されると、既存の分析方法も政策支援には不十分になりつつあるといえる。他方、これらの「新しいゼロエミッション社会に至る道筋」、特に地域による多様性の大きい民生部門では、まず方向性の提案と実行可能性の検証がなされた段階であり、どのような技術がどのように必要か、という定量的な検討はこれからとなっている。

本提案書では、最終的には低炭素社会およびそれ以降のゼロエミッション化へのシナリオ構築のため、日本の社会経済を図2-1のようにA.人口関連、B.産業部門、C.輸送部門、D.民生部門、E.ライフスタイルの大きく5つの分野に分け、それぞれから接近する。日本の地域的多様性を考慮し、日本全体のマクロスケールの視点と、地域のミクロスケールの視点を含む。これら各分野の相互依存性の拡大に着目して作業を進めねばならないことは言うまでもない。

本提案書では、まずD.民生部門のうち家庭部門に着目し、建物単位での省エネルギー化と太陽電池導入がどれほどの低炭素化に貢献するか、またどのような地域差が現れるかの潜在性を評価する。次いでC.輸送部門との連携について、電気自動車の効果を地域ごとの家庭用自動車輸送需要や保有台数の差異に着目して分析する。さらに、家庭と自動車の電力化が進展した場合の電気事業者への影響の予備評価のために、地域エネルギーモデルによる試算を行う。さらに、業務用建物の省エネ化については調査例に限られているが、現状についての分析を述べ、最後にC、D、E.を情報ネットワークで包括するスマートシティプロジェクトの知見をまとめる。これらの作業

は、今後の包括的な分析の一環となる。

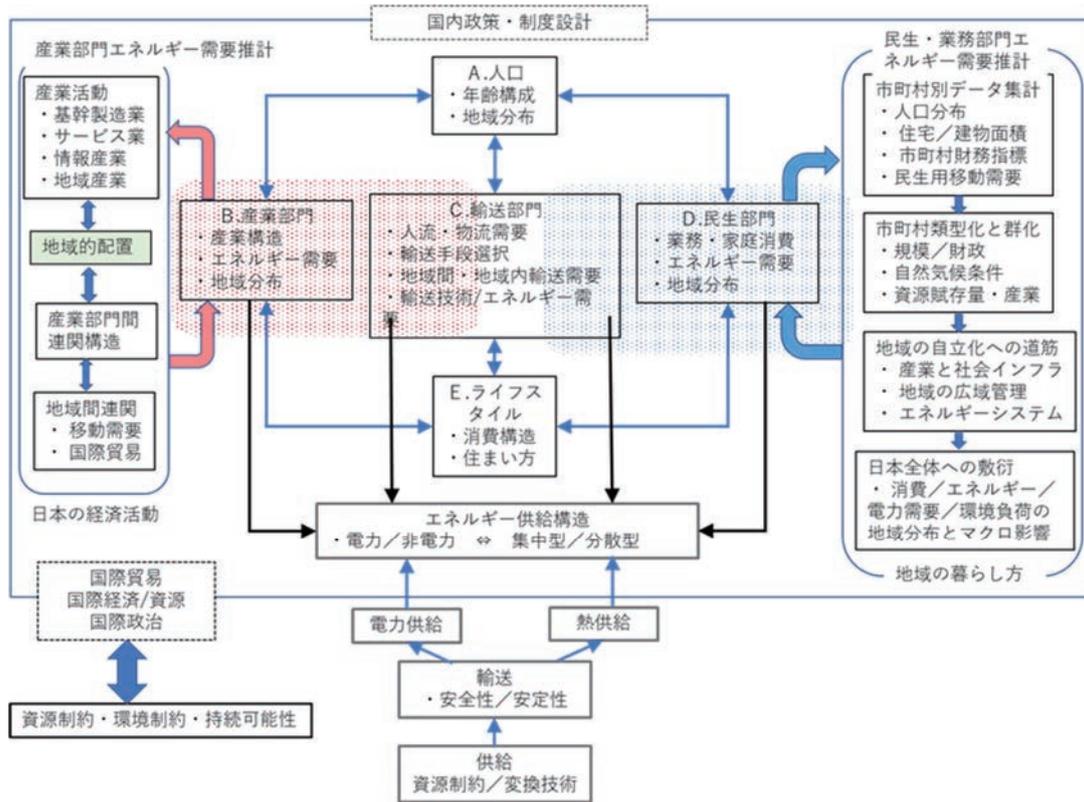


図 2-1 日本の社会経済シナリオ構築のマクロフレームと本提案の対象範囲

まず、A~E それぞれについて、日本の 2050 年の低炭素社会およびそれ以降のゼロエミッション化へのビジョンを構築する上での課題を以下にまとめる。

A. 日本の趨勢としての人口と世帯数、地域分布の変化

日本の人口の減少傾向はすでに周知であるが、国立社会保障・人口問題研究所はさらに 1,790 市区町村について 2045 年までの人口予測を出しており、中には 2015 年から人口が 1/4 になると予測される地域もある[17]。表 2-1 はその集計であるが、5,000 人未満の市区町村数の増加だけでなく 3~30 万人の中規模都市数、居住人口も大幅に減少している。全体的に、多くの市区町村がより小さな人口規模のグループに移行していく様子が伺える。他方、100 万以上の都市人口の割合は、2015 年の 23.6%から 2045 年の 26.4%に上昇しており居住形態の 2 極化の傾向もうかがえる。

現在、都市近郊のベッドタウンでは「スポンジ化」により空き家が増加しているが、現状では土地の持ち主が多いことや立地規制による再開発の難しさも指摘されている。

表 2-1 市町村別人口規模分布と予測

	人口規模	5千未 満	5千～1 万	1～3万	3～5万	5～10 万	10～30 万	30万～ 50万	50万～ 100万	100万 以上	合計
2015	市町村数	249	230	429	239	256	187	41	17	11	1659
2030		323	240	437	203	222	168	40	15	11	1659
2045		444	230	399	188	194	147	34	13	10	1659
2015	人口 (1,000人)	694	1,694	7,918	9,272	17,968	30,372	16,043	11,717	29,503	125,181
2030		815	1,723	8,218	8,065	15,785	27,137	15,494	10,320	29,932	117,490
2045		1,054	1,705	7,388	7,305	13,821	24,047	13,068	8,974	27,744	105,106

(*) 人口予測が未公表の福島県については除外した。また政令都市は区合計値を用いたため合計市町村数は1,790よりも少ない。

人口規模と自治体の財政力指数の関係はしばしば議論されており、総務省[18]では「人口規模が3万人以上なら目的別歳出額が平準化され、2万人以上なら財政力指標が0.5を超える」点を指摘している。このことは国立環境研究所(2008)[12]の「都市集中型社会(シナリオA)か地方分散型社会(シナリオB)か」という概念軸に「どの程度の市町村を最低限度の規模とみるか」という量的な評価が加わる。いずれにしても日本の一部の大都市以外は何らかの再編成が余儀なくされることになるが、同時に、国土の新しい利用形態を導入する機会であるともいえる。

以上の趨勢を念頭に置き、ここでは地域のビジョンを以下の①～④を満たすものとして検討する。

- ① 人口が少なくとも、独自の地場産業あるいは地域資源がある場合は、これを持続可能に維持し、周辺地域の拠点となる。ただし行政、教育、医療などの社会インフラは移動施設、情報技術の援用により、一定水準以上のサービスが全ての地域で維持されねばならない。
- ② 人口が少なくとも、利用可能な自然資源がある場合は、その活用を技術開発で実現する。観光資源もこれに含まれるが、開発は持続可能なものでなくてはならない。人口が少なく自治体として自立できない場合も、バイオマスエネルギー供給や水力発電など何らかの供給源になりうる場合は、居住地でなく生産地として残る姿も考えられる。
- ③ 人口が少なくとも、工業団地のように整備された土地やインフラを持つ場合は、特性を活かした製造業以外の産業を誘致できる可能性がある。Society5.0で不可欠な情報インフラ、特にデータセンターなどは近年地方での立地も増えており、中にはサーバからの排熱と農林水産業を連携させた例もある[19]。
- ④ スポンジ化の進んだ郊外住宅地域では、大規模開発が困難なことが多い一方、比較的都市に近接していることが多いので、サテライトオフィスや老健施設、保育施設など小規模開発に適する。したがって、地域の独自産業の育成あるいは産業活動を支援するインフラ地域としての戦略が必要となる。

B. 日本の産業構造のビジョン

基本要件は、①低炭素社会と整合的なものであること、②雇用が確保されること、③世界の低炭素化への貢献と市場競争力を維持できることである。

低炭素社会を目指した産業活動については、政府による部門別の活動と見通しのまとめ[20]をはじめ、産業部門ごとの低炭素化の可能性に注目した文献は多い。しかし、低炭素化と世界貿易の中で、日本の経済成長とどのように両立させるかは、部門ごとの見通しの積み上げからはなかなか合意が難しいところがある。例えば、CO₂排出80%削減制約の下では、再生可能エネルギーの増加に伴う電熱利用の拡大が有力と考えられるが、これは産業部門によっては可能でも、鉄鋼

業やセメント業など炭素排出の化学プロセスを含む場合は適用が困難で生産の大幅な減少を余儀なくされる。鉄鋼業では水素還元製鉄法の提案があるものの、実現は容易ではないと予想されている。また、これらの産業の他地域への移転あるいは外国製品の輸入増加による置き換えでは温暖化の解決策にはならない。このため、ゼロエミッション化対策としては、省エネルギーの追求と何らかの炭素回収貯蔵オプションの導入が必要となる。後者には森林吸収源の拡大と炭素回収貯留（CCS）が手段ではあるものの、いずれも日本では拡大に限界があることから、現状では炭素回収後に他国に輸送した後貯留するか、直接的な大気からの炭素回収（DAC）の他国での実施に実行可能性があると考えられる。

次に、日本はどのような産業で輸出競争力を確保するかも、雇用確保の上からは重要である。世界に需要があり、かつ日本が競争力を持つ産業はさらに成長させねばならない。貿易統計では、日本は自動車、生産機械、素材（鋼材を含む）に強く、またコマやリンゴなど一部農産物は近年輸出が増加している。既存の産業だけでなく新たな産業が創出された場合、このような産業をいかに低炭素社会に適応させつつ拡大するか、またこれらの産業を支えるにはどのような産業が必要かといった関連構造を常に見据える必要がある。

また、小規模でも地域の産業が自立する可能性がある。[19]にあるアクアポニックスは情報技術と農林水産業の融合の一例である。

医療など対人サービス産業や情報コンテンツ産業はクールジャパンでも注目された有望産業であるが、同時に労働条件が厳しいことも知られており、持続可能性のための継続的な人材確保が解決される必要がある。

C. 輸送システムのビジョン

輸送システムは、伝統的に、①国内対国際、②大量対少量、③物流対人流、④地域間対地域内、⑤長距離対短距離、⑥公共対私的、⑦陸、海、空、などいくつかの次元で分類されてきており、そのための動力装置や燃料もほぼ対応がついていた。近年の電動化は、このいくつかの軸を変えている。シェアリングエコノミーと一体化することで「ラストワンマイル」を担う e-スクーター、e-キックボードは欧米や中国で見慣れた存在であり、ドローンは短距離+空というこれまでにない領域の手段となっている。しかし、低炭素社会に接近する手段としては、まず短距離・人流・私的・陸上輸送の EV 化である。これは C と D の融合領域でもある。このような融合領域はこれまで叙述的に語られてきたのみで融合化の定量的な評価例はまだ見られない。

同様に、地域内・短距離・物流輸送も宅配需要の今後の動向の中で議論されねばならない。

D. 民生部門エネルギーシステムのビジョン

旧来の家庭や業務のエネルギーシステムは、照明や暖房などの用途とエネルギー種がほぼ 1 対 1 対応であったが、CGS など複合用途に同時対応する機器や太陽電池など分散型電源の普及、需要家間の相互融通などにより物質バランスフローから情報ネットワークのアナロジーに変わりつつある。電力化は EV などの輸送手段に広がり、さらに地域内での自動運転が視野に入りつつある。このような変革は当然系統電力への需要に影響し、蓄電設備や安定化装置など必要な付随設備がシステムの中核になる可能性がある。この状況は上記 A. のもとでどの程度低炭素化に寄与するのか、またゼロエミッション化に向かってどれほどの追加費用が必要となるのかについては、技術の進展を合わせた定量的評価がまだなされていない。

E. ライフスタイル

消費構造や食文化などライフスタイル一般の変革による低炭素化は、物質的な消費抑制を「我慢」でなく「新たな価値」とする方向性のある価値観の誘導に踏み込むだけに、検討は慎重になされてきた。しかし一方で前述の IIASA-LED[2]は、スマートフォンが通話だけでなく情報収集、動画や音楽鑑賞など従来は機能ごとに保有していた家電機器を 1 台で統合できたことで大幅な電力消費を実現したことをあげた。また、自家用自動車の稼働率が 5%程度と低いことから、現在の様々な機器が保有主義から使用主義に代われば、資源消費の大幅な節減につながることを主張

した。これはシェアリングエコノミーによる需要削減の一例であり、日本でも **Mobility as a Service (MaaS)** [21]の一環として期待されている。シェアリングエコノミーでは機器の稼働率の向上によって必要な機器生産を減らすことが環境への寄与とされる。古着など中古品市場の拡大は時間的な財のシェアリングともいえる。ただし、このような生産の削減は価格向上にもつながるので、消費者の便益としてはトレードオフもある。

以上のように、低炭素社会のビジョン策定には多くの角度からの検討と分野間の横断的評価が鍵となる。これらのすべては一度に論じきれものではないので、本提案書では、このうち部門間融合による効率化が期待される地域エネルギーシステムに着目する。特に民生部門とモビリティの統合化について既存の調査に基づき評価し、次いでモデル構築による融合の効果の予備的な定量的分析を行う。これにより、この低炭素化がさらにその後のゼロエミッションに向け、現状の技術がどこまでを実現し、今後どのような課題が残るかを明らかにする。産業部門や都市間交通、物流などの輸送部門、ライフスタイルなどは今後の検討課題となる。

2.1.1 都市中核部のエネルギーシステムとモビリティ

ここでは、図 2-2 のようにオフィスビル、商業ビル、集合住宅、ホテル、病院等が主な需要家である。特性として 高人口密度、高昼夜間人口比のため、再エネ利用は限定的である一方、未利用熱源は有効利用される。システム設計としてはエネルギー高効率利用と災害時の供給信頼性が志向される。モビリティは短トリップ長+高交通密度である。そのため、エネルギーシステムとしては 500~700m 四方程度の自立エネルギー管理地区モジュールが配電網を通じて電力の相互連携を行う。土地の機会費用が極めて高く低稼働率の移動手段は忌避されるので、大規模輸送システム、中小規模輸送システム、パトランジット、カーシェアを含む多重公共交通システムが必要であり、サービスの長時間・高密度提供のための無人運転が物流・人流ともに広がる。

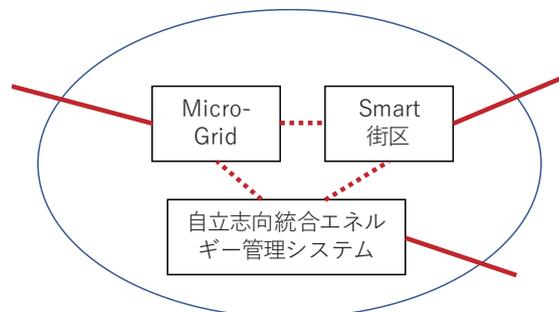


図 2-2 都市中核部のエネルギーシステム（点線は地域内熱電融通、実線は外部との受送電を示す）

2.1.2 都市外縁部のエネルギーシステムとモビリティ

都市中核部を含む都市外縁部は、図 2-3 のように多様な目的の施設が混在し昼夜間人口とも多いため、個々の建物の需要変動は大きいもののエネルギー融通は効率的なものとなると期待できる。再エネ導入、未利用エネルギー利用、排熱利用は効果的なものとなる。

ここでは、戸建住宅の割合が増加する。また集合住宅、オフィスビル、商業ビル、ホテル、病院等も低層建物の割合が増える。また学校、廃棄物処理場などの公共施設の割合も増加し、工場のような建物も増える。ここでは中人口密度、中昼夜間人口比であることから、低層建物を中心に屋上 PV が増加する。余剰電力の相互融通および工場・施設排熱利用の製材性は拡大するため、経済性からのエネルギー高効率利用を志向する。

モビリティでは、工場や施設のためトリップ長・手段とも多様+高交通密度となる。ここでは街区単位での MicroGrid、工場間の余剰熱相互融通などが入りやすい。物流の大規模長距離輸送・中長距離人流輸送システム、短距離輸送システムが混在し、現在最も混雑緩和が難しい地域である。土地の機会費用は高く自家用車保有インセンティブは低いものの、中長距離物流では現状では自動車に代わる中小規模輸送手段が乏しい。

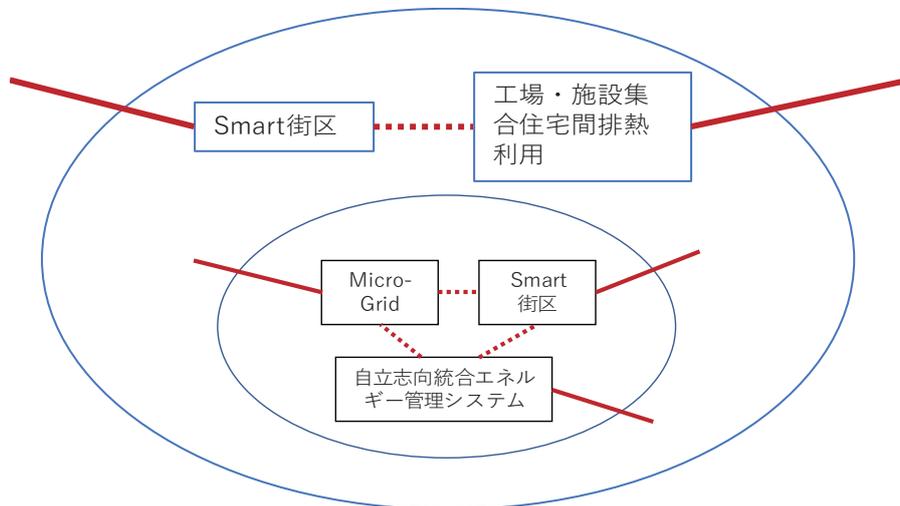


図 2-3 都市外縁部のエネルギーシステム（点線は地域内熱電融通、実線は外部との受送電を示す）

2.1.3 都市郊外/住宅地のエネルギーシステムとモビリティ

郊外/住宅地では図2-4のように戸建住宅の割合が増加し、建物密度も低下するため、スポンジ化が問題となる。再開発は中規模にとどまる。

土地にゆとりがあるため、地上設置PV、メガソーラー、風力も増加する。需要家の密度が低いことから余剰電力は域内・周辺地域・都市外縁部の需要家に輸送可能となる。森林や畜産・農産廃棄物が大量に発生する地域ではバイオマス利用が進展し廃棄物の資源化が進む。

郊外地域の中核となる商業・公共施設集中地域では再生可能エネルギーの利用と分散型システムの導入が進み、相互融通もなされる（各種サービス業務のコンパクト化）。地域によっては建物密度の低下と建物屋根面積増加に伴い、スタンドアロンのZEH、ZEH-M（ZEH化された集合住宅）が増える（基準は省エネ20%、年間再エネカバー率は100%）。

人口密度分布の偏りと中核地域へのサービス業務集中化のため、トリップ長は拡大し全体としては低交通密度となる。土地の機会費用が低く中核部以外ではサービス密度も低い。現状では自家用車保有インセンティブは高い一方、高齢化が進む地域では運転者の代替へのニーズは今後とも高まる。したがって、自動運転やシェアリングのインセンティブは高まる。

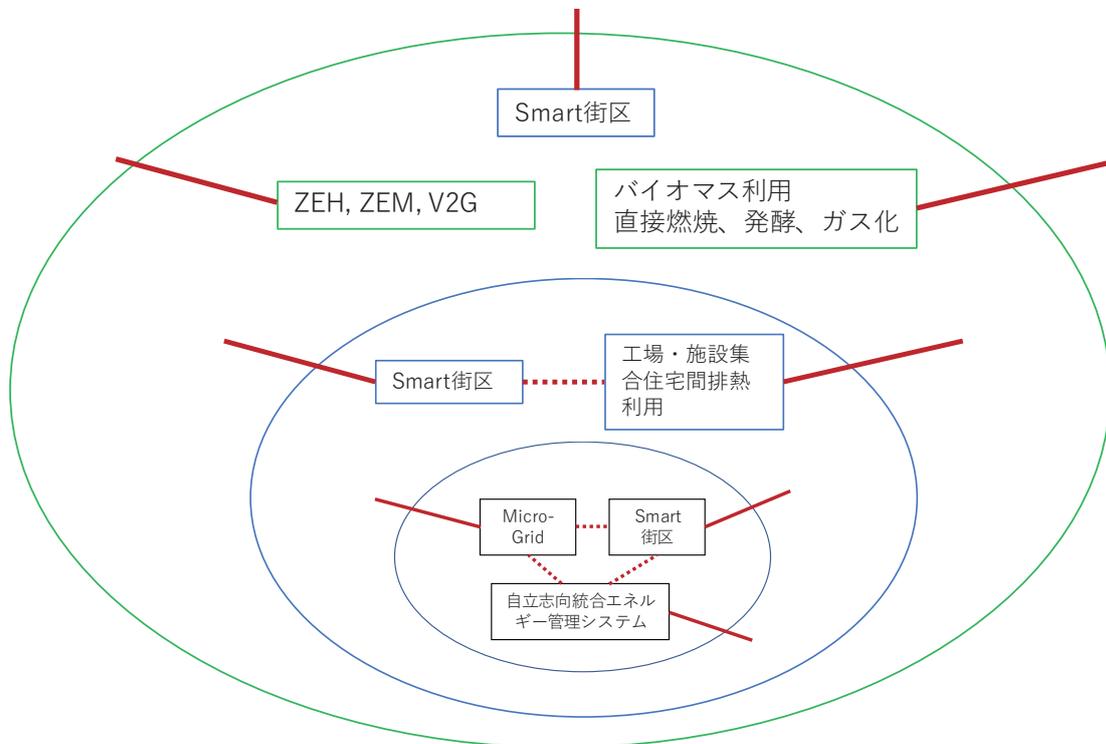


図2-4 都市郊外/住宅地のエネルギーシステム
(点線は地域内熱電融通、実線は外部との受送電を示す)

2.1.4 村落部のエネルギーシステムとモビリティ

ここでは図 2-5 のように建物密度、人口密度とも低下する。サービス機能の集中する区域では熱融通も導入されるが、基本はスタンドアロンでの省エネを迫る ZEH、ZEH-M、ZEB による。地上設置 PV、メガソーラー、風力も増加する。需要家の密度の低さから余剰電力は域内よりも周辺地域や都市外縁部の需要家に輸送し、ビジネスにつながる。森林や畜産・農産廃棄物の大量発生地域ではバイオマス利用が進展し廃棄物の資源化が進み、さらに再エネ供給地となる。

住民人口が低下し、かつ地域産業が維持可能な場合、居住地区と生産地区が切り離される。このため、現在と同様の通勤も残るが、同時に職種によっては IT やロボットによる遠隔作業の拡大もされる。この場合、生産性の大幅な上昇が必要となる（工業団地化）。土地と再エネ電力の供給力のゆとりから、土地依存度の高い産業に期待が集まる。これまではゴルフ場、テーマパーク、観光業、データセンター、研究拠点など居住従業者数に比べ高付加価値を期待された産業であったが、さらに農林業などとの連携が進む。

モビリティとしては、人口密度分布の偏りが拡大のため、サービスの集中化した中核地域へのトリップ長は伸びるが、全体としては移動の密度は低下する。自家用車保有インセンティブはさらに高い一方、高齢化に伴う無人運転車へのニーズは最も高まる。人口密度の低さから販売、医療等のサービスの一部は情報技術と移動店舗・移動診療所で補われる。

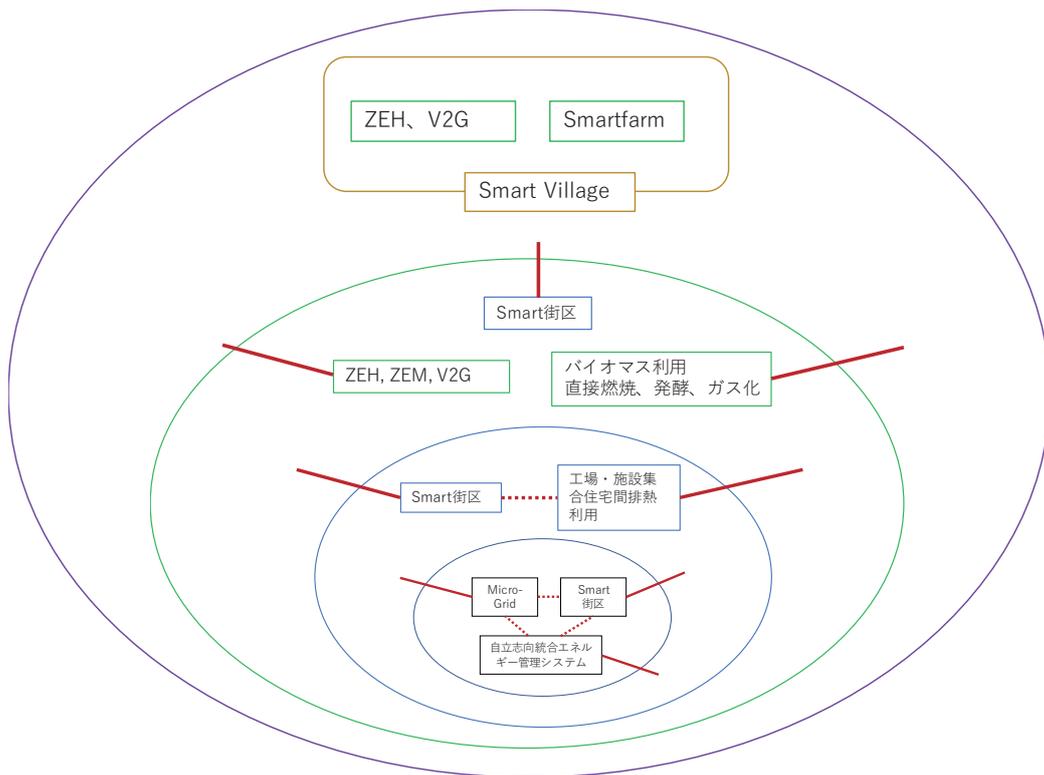


図 2-5 村落部のエネルギーシステム
 (点線は地域内熱電融通、実線は外部との受送電を示す)

2.2 地域民生部門低炭素化の定量的評価手順

ここでは、本提案書の地域別の民生部門、運輸部門のエネルギー需要変化の評価方法を示す。民生部門の低炭素化には建物の省エネルギー化とエネルギーインフラの低炭素化、運輸部門の低炭素化にはEV化とシェアリングに期待がもてる。

本提案書では、下記のような手順で評価を行う。まず始めに既存のエネルギー需要を把握し(図2-6 O)、次に高効率ヒートポンプ導入による暖房および給湯エネルギーの削減を行う(図2-6 A)。続いて、住宅の断熱性能向上による暖房および冷房エネルギーの削減を行う(ZEH-Ready)(図2-6 B)。さらに求めたエネルギー消費量と年間発電量が一致するPV容量等を算出する(図2-6 C)。ここで集合住宅やオフィスビルでは、PV設置面積の制約から、建物単独でのZEH-M/ZEB化が容易でない。そのためZEH化は戸建住宅に限定して考える。次いでEV導入効果を評価する(図2-6 D)。ZEH住宅では、年間の電力消費合計はEV電力需要合計と一致する。しかし時刻別に合理的な需給バランスを取るには電気事業者からの供給や、蓄電池、他の需要家との相互融通などの最適な運用が必要となる。

最後の図2-6 Eでは、スマート化により複数の需要家と複数のエネルギー供給源が合理的に連携される。この需要家にはモビリティも含まれる。また、図2-6 Dまでと異なり、需要マネジメントシステム(DR)により、供給側と需要側で主に価格と需給に関する情報交換が行われ、最適な運用が需給双方からなされる。このスマートシティは構想のみでこれまで実施例に乏しく、ここでは社会実験プロジェクトの報告書から効果を探ることとする。

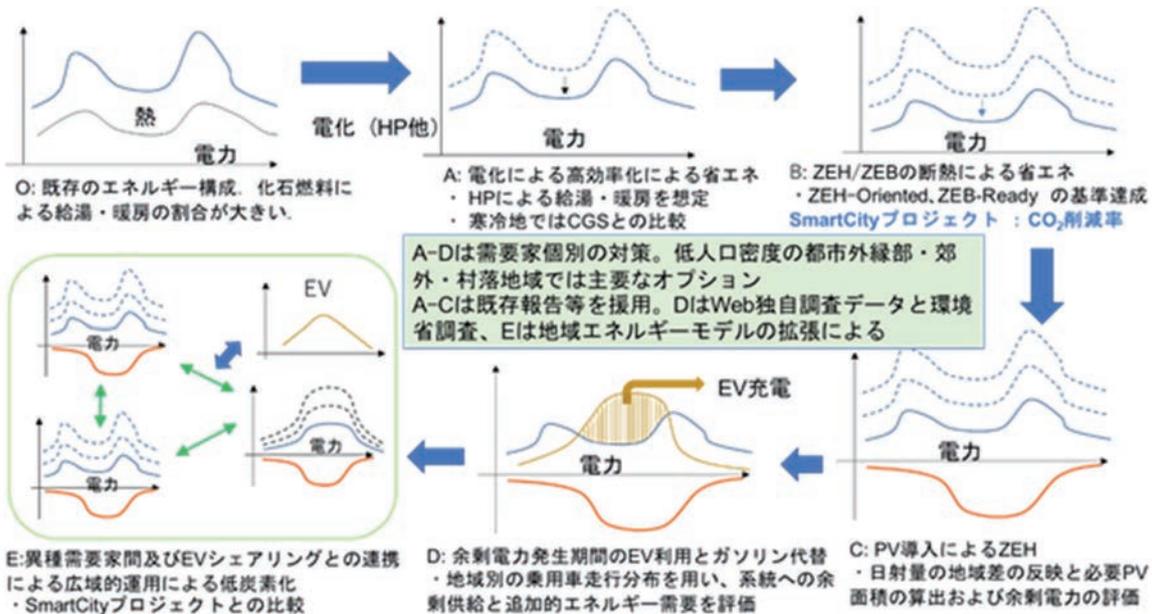


図 2-6 民生部門低炭素化評価のフロー

このような評価を行うことにより、地域ごとの民生部門低炭素化の可能性を定量的に評価することができる。特に、各需要家の消費エネルギーと電気事業者への需要変化を時刻別に知ることによって、電力系統への影響を明らかにできる。こうして、民生部門の需要側の省エネルギー化による低炭素化と供給側の電力低炭素化による相互作用の効果を定量的に評価することが可能となる。

3. 家庭部門におけるエネルギー需要変化の推計

3.1 背景と概要

日本の最終エネルギー消費量の約16%を家庭部門が占めている。家庭部門の低炭素化には、暖房、冷房、給湯、照明機器等の高効率化、建物の省エネ・創エネによる ZEH、ZEH-M 化、EV 導入による蓄電と、各機器と電気事業者との連携、制御のスマート化に期待がある。

本章では、家庭部門における第2章図2-6のフレームのO～C段階までの定量的評価を行う。まずO段階における現状の地域別エネルギー消費量を明らかにする。次いで、A段階の電力化とHP導入、B段階のZEH/ZEH-M Oriented化による断熱性能の向上、C段階のPV導入によるZEH/ZEH-M化の各段階のエネルギー消費量変化およびCO₂排出量変化を逐次求める。

3.2 ZEH・ZEH-Mにおけるエネルギー消費量の推計

ZEHとは「外皮の断熱性能等を大幅に向上させるとともに、高効率な設備システムの導入により、室内環境の質を維持しつつ大幅な省エネルギーを実現した上で、再生可能エネルギー等を導入することにより、年間の一次エネルギー消費量の収支がゼロとすることを目指した住宅」[22]であり、集合住宅においてはZEH-Mと呼ばれる。本章では、HPの導入による暖房/給湯用エネルギー効率改善と、住宅の断熱性能向上による暖房/冷房用エネルギー消費削減を行い、そのときのエネルギー使用量をPV発電で賄う住宅をZEHとする。

まず始めに、図2-6のO段階として現状の世帯あたりエネルギー消費量を地域別に把握するために、環境省が実施している平成29年度家庭部門のCO₂排出実態統計調査[23]から、10地域別建て方別世帯人数別の年間エネルギー消費量[GJ/(年・世帯)]を求めた。この時、「2人以上世帯」の世帯人数合計が国立社会保障・人口問題研究所の世帯の推移[24]の世帯人数と一致するように、数値の補正を行っている。

次に、同図A段階の評価として(株)住環境計画研究所の家庭用エネルギー統計年報[25]を使用してエネルギー使用量を用途別に分け、HP導入時のエネルギー消費量[GJ/(年・世帯)]およびCO₂排出量[kg-CO₂/(年・世帯)]を求めた。HPのCOP値はメーカー各社の技術報告[26][27]を参考に、10地域別に設定した。さらに、同図B段階として住宅の断熱性能向上を実施した場合のエネルギー消費量[GJ/(年・世帯)]およびCO₂排出量[kg-CO₂/(年・世帯)]を求めた。最後に、平成29年度家庭部門のCO₂排出実態統計調査[23]から10地域別のPV発電効率[GJ/(年・kW)]を算出し、同図C段階の世帯あたりのエネルギー消費量を賄うために必要なPV容量を求めた。これらの結果を、戸建住宅と集合住宅について取りまとめたものが、以下の表3-1および表3-2である。

表 3-1 戸建住宅におけるエネルギー消費量と CO₂ 排出量変化の推計結果

推計の仮定				戸建住宅													(補正後 2015年) 2人以上 世帯の 平均人 数
				単身世帯						2人以上世帯							
				従来住宅		HP付住宅		HP付断熱住宅		従来住宅		HP付住宅		HP付断熱住宅			
系統電力 CO ₂ 排出 係数[kg- CO ₂ /kW h]	COP	空調 削減率 [%]	太陽光 発電効 率 [GJ/(k W・ 年)]	年間エネ ルギー消 費量 [GJ/(世 帯・年)]	年間CO ₂ 排出量 [kg- CO ₂ /(世 帯・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [GJ/(世 帯・年)]	年間CO ₂ 排出量 [kg- CO ₂ /(世 帯・年)]	年間エネ ルギー使 用量 [GJ/(世 帯・年)]	ZEH時 必要PV容 量[kW]	北海道	年間エネ ルギー消 費量 [GJ/(世 帯・年)]	年間CO ₂ 排出量 [kg- CO ₂ /(世 帯・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [GJ/(世 帯・年)]	年間CO ₂ 排出量 [kg- CO ₂ /(世 帯・年)]	年間エネ ルギー使 用量 [GJ/(世 帯・年)]	ZEH時 必要PV容 量[kW]	
0.666	3.0	20%	3.74	53.20	5,045	26.71	4,941	24.88	6.7	北海道	70.55	7,055	35.42	6,552	32.99	8.8	2.80
0.521	3.5	20%	3.48	34.48	3,280	17.63	2,552	16.85	4.8	東北	57.93	5,646	29.63	4,287	28.30	8.1	3.21
0.475	4.0	20%	4.06	24.03	2,265	13.59	1,794	13.27	3.3	関東甲信	40.42	3,670	22.87	3,017	22.33	5.5	2.99
0.593	3.5	20%	3.63	28.90	3,095	16.80	2,768	16.23	4.5	北陸	54.94	6,087	31.94	5,262	30.85	8.5	3.26
0.476	4.0	20%	3.96	20.79	2,094	12.26	1,621	11.98	3.0	東海	39.77	3,833	23.46	3,102	22.91	5.8	3.14
0.435	4.0	20%	3.94	21.88	2,004	12.58	1,520	12.27	3.1	近畿	40.09	3,516	23.04	2,784	22.48	5.7	3.00
0.669	4.0	20%	3.96	25.30	3,471	15.66	2,910	15.27	3.9	中国	38.23	5,394	23.66	4,397	23.07	5.8	3.03
0.514	4.0	20%	3.84	20.85	2,396	13.34	1,905	12.98	3.4	四国	38.36	4,352	24.55	3,505	23.88	6.2	2.97
0.438	4.0	20%	3.89	21.94	2,295	14.04	1,708	13.70	3.5	九州	36.17	3,610	23.15	2,816	22.59	5.8	3.01
0.786	4.0	20%	4.00	12.56	2,369	10.04	2,191	9.71	2.4	沖縄	28.24	5,020	22.56	4,926	21.83	5.5	3.22

表 3-2 集合住宅におけるエネルギー消費量と CO₂ 排出量変化の推計結果

推計の仮定				集合住宅													(補正後 2015年) 2人以上 世帯の 平均人 数
				単身世帯						2人以上世帯							
				従来住宅		HP付住宅		HP付断熱住宅		従来住宅		HP付住宅		HP付断熱住宅			
系統電力 CO ₂ 排出 係数[kg- CO ₂ /kW h]	COP	空調 削減率 [%]	太陽光 発電効 率 [GJ/(k W・ 年)]	年間エネ ルギー消 費量 [GJ/(世 帯・年)]	年間CO ₂ 排出量 [kg- CO ₂ /(世 帯・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [GJ/(世 帯・年)]	年間CO ₂ 排出量 [kg- CO ₂ /(世 帯・年)]	年間エネ ルギー使 用量 [GJ/(世 帯・年)]	ZEH時 必要PV容 量[kW]	北海道	年間エネ ルギー消 費量 [GJ/(世 帯・年)]	年間CO ₂ 排出量 [kg- CO ₂ /(世 帯・年)]	年間エネ ルギー消 費量 [GJ/(世 帯・年)]	年間CO ₂ 排出量 [kg- CO ₂ /(世 帯・年)]	年間エネ ルギー使 用量 [GJ/(世 帯・年)]	ZEH時 必要PV容 量[kW]	
0.666	3.0	20%	3.74	23.35	2,377	11.72	2,169	10.92	2.9	北海道	45.72	4,178	22.95	4,246	21.38	5.7	2.80
0.521	3.5	20%	3.48	19.23	1,733	9.83	1,423	9.40	2.7	東北	41.52	3,679	21.24	3,073	20.29	5.8	3.21
0.475	4.0	20%	4.06	14.99	1,414	8.48	1,119	8.28	2.0	関東甲信	33.44	2,853	18.92	2,497	18.47	4.5	2.99
0.593	3.5	20%	3.63	17.50	1,856	10.18	1,676	9.83	2.7	北陸	40.02	3,779	23.27	3,832	22.47	6.2	3.26
0.476	4.0	20%	3.96	15.65	1,520	9.23	1,220	9.01	2.3	東海	35.85	3,086	21.14	2,795	20.65	5.2	3.14
0.435	4.0	20%	3.94	15.80	1,438	9.08	1,097	8.86	2.2	近畿	33.39	2,701	19.19	2,319	18.73	4.7	3.00
0.669	4.0	20%	3.96	15.21	1,910	9.41	1,750	9.18	2.3	中国	30.73	3,491	19.02	3,534	18.55	4.7	3.03
0.514	4.0	20%	3.84	12.16	1,351	7.78	1,111	7.57	2.0	四国	30.48	3,030	19.51	2,785	18.97	4.9	2.97
0.438	4.0	20%	3.89	13.83	1,300	8.85	1,077	8.64	2.2	九州	30.22	2,674	19.34	2,353	18.87	4.9	3.01
0.786	4.0	20%	4.00	10.23	1,770	8.17	1,785	7.91	2.0	沖縄	21.72	3,266	17.35	3,789	16.79	4.2	3.22

ZEH 達成に必要な PV 容量をみると、表 3-1 の戸建住宅では、2.4kW~8.8kW となる。住宅メーカーのパフレットには5~10kW 程度を搭載したモデルも見られることから、各地域とも ZEH を実現する PV 設置の可能性はある。一方で、集合住宅においては、全世帯が敷地内に ZEH-M を達成するだけの PV 容量を設置することは困難と予想される。集合住宅でも一次エネルギーを75%以上削減した Nearly ZEH-M の実績例もあることから、今後の低炭素化に向けては、まず省エネルギー化を導入し、次いで PV 導入拡大の可能性を模索することとなる。以下では、表 3-1、表 3-2 の結果を用いて、将来世帯数推移と ZEH 普及による家庭部門の CO₂ 増減率を示す。

3.3 将来世帯数推計に伴う CO₂ 削減の可能性

まず始めに、国立社会保障・人口問題研究所の世帯数の推移[22]から、2人以上世帯における世帯人員数を算出した。結果を下表 3-3 に示す。

表 3-3 2人以上世帯における世帯人員数の算出結果

		2015年	2020年	2025年	2030年	2035年	2040年
「2人以上世帯の人数」	北海道	2.80	2.74	2.67	2.62	2.61	2.60
	東北	3.21	3.10	2.99	2.91	2.83	2.77
	関東甲信	2.99	2.91	2.86	2.81	2.79	2.77
	北陸	3.26	3.18	3.10	3.03	2.96	2.90
	東海	3.14	3.07	3.00	2.95	2.90	2.86
	近畿	3.00	2.92	2.86	2.82	2.79	2.78
	中国	3.03	2.97	2.92	2.87	2.84	2.83
	四国	2.97	2.89	2.81	2.76	2.72	2.68
	九州	3.01	2.94	2.88	2.84	2.81	2.80
	沖縄	3.22	3.11	3.02	2.96	2.91	2.89

次に、国立社会保障・人口問題研究所の世帯数の推移[24]と平成30年住宅・土地統計調査の住宅及び世帯に関する基本集計[28]を用いて、将来の世帯人数別建て方別の世帯数を求めた。この時、世帯数合計が一致するように、同集計[28]の世帯数を調整している。将来の世帯人数別建て方別の世帯数の仮定を次表 3-4 に示す。

表 3-4 将来の世帯人数別建て方別の世帯数の仮定

		2015年	2020年	2025年	2030年	2035年	2040年
戸建	単独	5,245,596	5,566,793	5,770,174	5,865,079	5,829,040	5,565,537
	2人以上	23,183,801	23,177,651	22,802,124	22,212,572	21,416,222	20,276,547
集合	単独	13,172,326	13,775,643	14,189,610	14,388,636	14,404,454	14,378,507
	2人以上	11,730,074	11,586,488	11,354,175	11,017,446	10,665,268	10,536,475

これらの値を用いて、将来世帯数推計に伴う CO₂ 削減率を算出した。結果を次に示す。

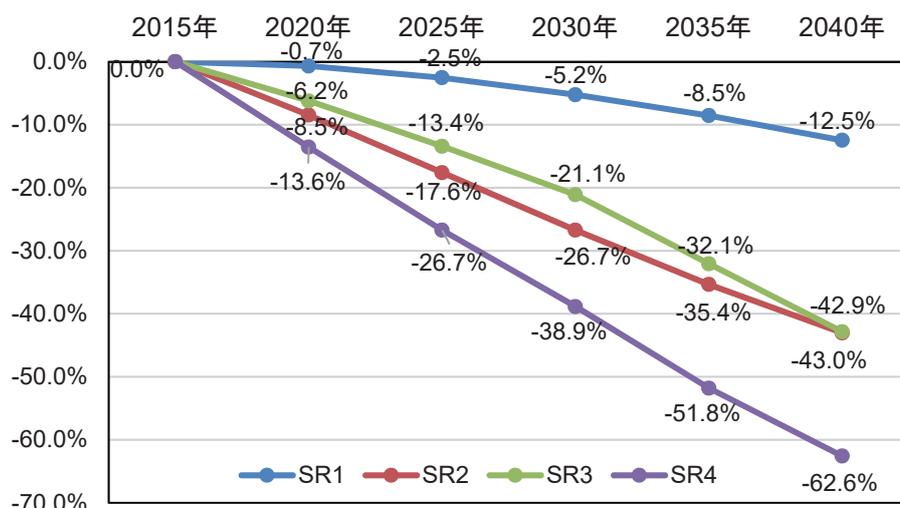


図 3-1 家庭部門の CO₂ 増減率

SR1：人口、世帯の増減のみに従う場合

SR2：SR1に加え、全新築戸建住宅^aが ZEH に代わる場合

SR3：SR1に加え、CO₂ 排出係数^bが変化する場合

SR4：SR1に加え、全新築戸建住宅が ZEH に代わり、CO₂ 排出係数も変化する場合

SR2 のような人口の増減と住宅の ZEH 化のみ、SR3 のような人口の増減と電力の CO₂ 排出係数の低減のみでは、家庭部門において 2050 年に CO₂ 排出量 80%削減目標を達成できない。SR4 のように人口増減に従い全新築戸建住宅が ZEH になり、かつ、電力の CO₂ 排出量も 80%削減を達成する場合は 2050 年に家庭部門の CO₂ 排出量を 80%削減できる可能性がある。現在、ZEH ビルダーは「受注する住宅のうち ZEH が占める割合を 50%以上にする」という目標を宣言・公言している。新築戸建住宅の 50%が ZEH となる場合で、2050 年 CO₂ 排出量 80%削減目標を達成するためには、電力の CO₂ 排出係数の 80%削減と、ほぼ全ての住宅での HP の導入が必要となる。逆の見方をすれば、電力の CO₂ 排出量削減と HP の標準装備化等の高効率機器導入により、目標達成に必要な ZEH 普及率を下げる事が可能となる。

ZEH/ZEH-M 化は、高効率機器の導入と断熱性能の上昇による電力需要の削減および PV の導入による創エネの増加により、大幅な家庭部門における CO₂ 排出量削減を可能とする。しかし住宅の耐用年数が 40 年のため、新築住宅が 100%ZEH 化されても、SR1 シナリオからの全体的な追加的削減効果は 30%程度にとどまる。現状では導入率は新築住宅の約 11%であることから見れば、図 3-1 の SR2 シナリオの達成も困難と言わざるを得ず、実現には強力な導入推進策が不可欠となる。

^a 戸建住宅寿命を 40 年と仮定し、ストックベースの ZEH 普及率は 2015 年を基準に、2020 年 (11.7%)、2025 年 (23.15%)、2030 年 (34.12%)、2035 年 (44.39%)、2040 年 (53.82%) とした。詳細は、付録 1 参照。

^b CO₂ 排出係数は 2030 年に 0.37kg-CO₂/kWh、2050 年に 0.11 kg-CO₂/kWh を達成するように、どの地域においても線形変化すると仮定した。

4. 家庭用エネルギーと EV の連携による CO₂ 排出削減の地域別評価

4.1 家庭と電気自動車との連携評価

本章では、第2章図2-6のフレームのD段階「EVと家庭との連携」についての定量的評価を論じる。電気自動車の走行エネルギー効率（燃費に替えて電費とも呼ばれる）は、通常のエンジン自動車と同様、車種や走行パターンによって変化する[29]。しばしば7km/kWhが用いられるが、これはガソリンに換算すると約64km/Lとなり、二次エネルギー基準ではきわめて低燃費となる。また、EVの蓄電池と太陽電池や風力発電などと組み合わせ、系統電力との間で双方向の充放電が果たせれば（Vehicle to Grid:V2G）、走行時のゼロエミッション化と電源変動の吸収との同時解決も期待できる。これは、建物部門と輸送部門の強力な温暖化対策手段として期待されてきた⁶。

しかしながら、現状では次の問題が残る。まず、再生可能エネルギー、特にPVでどの程度EVの需要を満たせるかは、EVにどの時間帯にどの程度充電が必要かの情報が必要である。しかし、現在自家用車の走行需要データは限られている。また配送やタクシーのように昼間に自動車を使用し続ける場合はもちろん、雨天や曇天では充電は系統電力に頼らざるを得ないため、電源系統がゼロエミッション化されていない以上、どうしても電力系統からの排出は残る。その大きさは、電源系統のCO₂排出係数とEVの電力需要による。これらを考慮した上で、家庭へのEVとPVの導入効果を定量的に評価するには、時刻別の家庭用エネルギー需要、PV発電供給量、EVのエネルギー消費と最適な充電パターンを地域別さらに日本全体に積み上げる必要がある。

本章では、その第一段階として、前章までに述べた家庭部門の地域・月別エネルギー消費推計値と東京理科大学で2011～2012年にかけて実施された自動車利用に関するWebアンケート調査（有効回答数 全国計 10,800件）[9]を組み合わせることで、EV導入によるCO₂排出削減効果を定量的に分析する。

4.2 既存統計と自動車利用アンケート調査に基づく自動車走行需要の推計

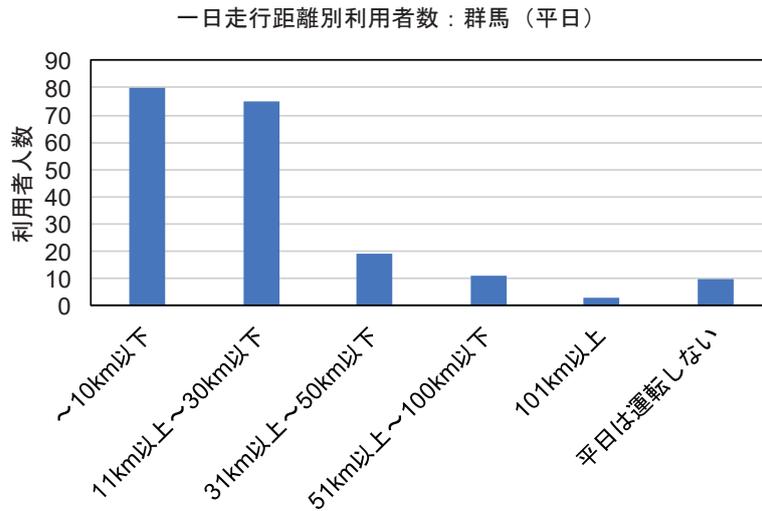
EVの導入効果を見るには、まず自動車のエネルギー需要についての詳細な推計が必要である。日本10地域に対しては総合エネルギー統計[30]詳細版に乗用車用燃料消費家計利用寄与分の記載があり、また家計調査にも世帯当たりガソリン購入額が報告されている。自動車検査協会は世帯当たり自動車保有台数を公表している。ただしこれらからは、月別あるいは日別の走行需要は得られない。

東京理科大学で行った上記自動車利用Webアンケート調査は、2012年に1日平均走行距離（平日・休日）、年間平均走行距離、自動車利用時間帯、出先での駐車時間、利用目的などを保有自動車別に尋ねたものである。一例として群馬県の平日走行距離（1台目）と使用時間帯（1台目）の比較を図4-1に示す。走行距離に広がりがあるため、本研究では走行距離の累積分布F(x)に、

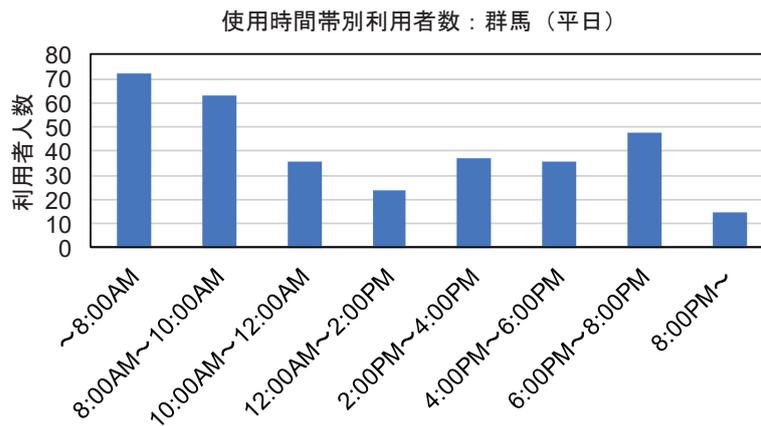
$$F(x)=\min[a \cdot \ln(x) + b, 1] \quad (4.1)$$

上式をあてはめ、さらに「利用しない」割合 θ を考慮して補正分布関数 $G(x)=\theta+(1-\theta)F(x)$ を用いている。なお地域全体のCO₂排出量推計の際には、単に地域世帯数を乗じるのではなく、「自動車非保有世帯」の割合を考慮する必要がある。

⁶ 近年、EVの蓄電機能に着目し、EVを家庭(V2H)など様々な施設と連携させ効率化を計る提案がなされている。これらはV2Xと総称される。



(a) 群馬県における平日走行距離



(b) 群馬県における平日使用時間帯

図 4-1 アンケート調査結果例：群馬県における平日走行距離と平日使用時間帯

このアンケート結果に基づく 47 都道府県の走行距離分布のパラメータ、「自動車を使用しない」割合、およびこれから求めた平均走行距離と走行距離分布の 80%をカバーする 80%走行距離を平日・休日別に求めたものを表 4-1 に示す。アンケートでは、複数台数所有の世帯に対しては主要な順に 3 台まで走行距離等を尋ねているので、ここでは 1 台目についての結果を示している。

従来型自動車の平均燃費を 12km/L、EV の電費を 7km/kWh、電気事業者の CO₂ 排出係数を 0.496kg/kWh[31]と仮定すると、家庭用と自動車用を含む在来型（PV なし）、全電化（PV なし）、ZEH 化時（PV あり）の世帯当たり CO₂ 排出削減量を県別に推計できる。ここでは、在来型住宅（PV なし）とエンジン車（ICE）を基準として、EV さらに PV 導入と断熱化による ZEH 化を導入した場合の CO₂ 排出削減率推計結果を表 4-2 に示す。ただし、ここでは複数台保有の場合はアンケート調査に基づく保有率で調整した平均保有台数をまず算出し、次いで自動車検査協会による平成 30 年県別自動車保有台数[32]に合わせた補正を行っている。

表 4-2 の在来型戸建て住宅を見ると、EV 起源 CO₂ 排出最小の東京都 (129.8kg-CO₂/年) から最大の山形県 (726.1kg-CO₂/年) まで約 5.6 倍の差がある。これは自動車走行需要と保有台数の差を表すもので家庭部門と輸送部門を同時に考慮する際の地域性の指標となる。

全電化の効果は、戸建て住宅で 14.5%~34.9%、集合住宅で 7.8%~33.1%であり、地域差はあるものの概ね約 30%となる。これが EV の連携効果となる。

さらに、もし家庭に年間一次エネルギー消費と等しいだけの PV が設置され、かつ余剰電力が全て系統電力にゼロ排出電源として供給されるという ZEH/ZEH-M 化が果たされ、その供給分が全て既存電源を置き換えた上で、EV がガソリン自動車を置き換えるとするなら、CO₂ 排出削減の効果は戸建て住宅で 87.3%~96.7%、集合住宅では 71.5%~94.8%と広がる。いずれも自動車保有台数の少ない集合住宅ではやや削減率も低下する。

ただし、ZEH-M は規定上必要な PV 設置面積を集合住宅敷地内に設置する必要があるが、これを実装可能な場合は限定されると指摘されており、現状では普及が難しい。敷地外への PV 設置とそこからの輸送が認められる必要があろう。

前章と合わせた結果が示唆することは、以下の 5 点である。

第一に、家屋の全電化と ZEH-Ready 化の効果は低炭素化に大きく寄与するが、ZEH では PV など創エネ機器が建物の敷地内に設置されることが要件となるため、集合住宅の ZEH-M の実現は制約が大きい。そのため敷地外に PV が設置されていても ZEH-M と認定される方向性が望ましいことになる。また現状では新築戸建て住宅の ZEH 化率は 11%程度であり、ZEH+EV の潜在性を実現するには強力な推進策が不可欠である。

第二に、モビリティの観点からは、EV 化がエネルギー消費の削減と CO₂ 排出の削減に大きく寄与することは疑いない。他方、現状を見ると、日本では HEV 化は進んだが EV 化は遅れており普及推進のインフラ整備が必要である。次に大都市圏以外では、公共交通インフラの不足と移動手段の個人所有化が同時並行的に進み、自動車移動需要が拡大してきた。現状では、シェアリングエコノミーへの転換による低炭素化には大きな過去からの方向転換が必要であるとともに、乗用車の EV 化のみでは将来的な高齢化社会への対応策としては不十分であり、代替手段が必要なものもまた示唆されている。

第三に、ZEH 化後の家庭部門からの CO₂ 排出は、もっぱら電気事業者の排出係数で決まることになる。したがって、電気事業者の排出係数が大幅に低下すれば、当然家庭部門の排出も、EV からの排出も移動需要に比例して低下することになる。

第四に年間合計発電電力量と年間電力需要合計のみからは家庭部門の ZEH 化に必要な PV 設置面積は 10kW 以下であり、戸建て住宅では現実的な範囲に収まるものの、積雪のある日本海側では年間の変動も大きく冬季はほとんど期待ができない。もしこの変動を全て蓄電池のみで吸収しようとする蓄電池容量は莫大なものとなる。

第五に、家庭部門に大量に PV が搭載された場合、時間帯によっては電気事業者による余剰電力の全量買い取りができず出力抑制がなされる可能性がある。この場合、住宅に PV を追加導入しても、この時間帯ではそれ以上の CO₂ 排出削減は進まない。本章の評価は、電源構成を考慮しない潜在性評価であるため、この問題を明らかにするには家庭部門の評価は電源構成と統合化させる必要がある。これは次の段階の課題である。

第六に、冬季、寒冷地では、HP の成績係数 (COP) も低下する。この場合、電力化の限界が顕在化し、バイオマス燃料等で補うシステムが必要となろう。暖房が必要な場合、EV の電費が急激に低下することも知られており、地域性を考慮したエネルギーシステムの検討はさらに詳細な検討が必要とされる。

表 4-1 自動車利用アンケートに基づく県別走行距離分布パラメータ、平均および80%走行距離

	平日			休日			世帯数	平均走行距離(km)			80%カバー距離	
	a	b	θ	a	b	θ		平日	休日	月合計	平日	休日
北海道	0.146	0.341	10.1%	0.174	0.201	4.9%	936	14.89	18.29	473.93	23.12	31.44
青森県	0.159	0.297	9.1%	0.201	0.089	11.4%	132	14.62	19.24	475.61	23.53	34.52
岩手県	0.170	0.240	6.2%	0.202	0.076	8.8%	113	15.27	17.96	479.56	26.88	35.95
宮城県	0.173	0.211	12.2%	0.205	0.056	4.2%	336	15.74	20.39	509.46	30.28	37.73
秋田県	0.159	0.286	3.4%	0.197	0.090	5.6%	89	17.02	19.21	528.20	25.33	36.48
山形県	0.164	0.262	1.9%	0.148	0.317	5.8%	104	18.85	17.21	552.31	26.42	26.11
福島県	0.168	0.246	8.4%	0.187	0.111	5.2%	155	16.00	18.48	499.87	27.27	39.83
茨城県	0.182	0.176	9.1%	0.207	0.049	7.1%	394	17.50	20.91	552.31	30.76	37.82
栃木県	0.191	0.125	7.0%	0.207	0.042	4.8%	229	17.82	20.02	552.14	34.10	39.29
群馬県	0.171	0.228	5.1%	0.180	0.180	5.1%	198	17.60	18.59	535.91	28.17	31.61
埼玉県	0.137	0.379	20.9%	0.160	0.276	5.1%	493	12.27	16.27	400.12	21.36	26.40
千葉県	0.146	0.336	20.4%	0.179	0.183	8.0%	460	13.36	16.64	427.02	24.13	31.27
東京都	0.128	0.410	32.4%	0.196	0.087	6.8%	472	9.18	19.90	361.29	21.09	38.30
神奈川県	0.129	0.427	24.1%	0.171	0.221	6.0%	482	11.03	17.48	382.43	17.93	29.67
新潟県	0.145	0.337	9.3%	0.185	0.152	4.5%	269	14.28	19.24	467.96	24.45	33.37
富山県	0.145	0.354	5.3%	0.170	0.234	4.5%	133	15.75	16.84	481.28	21.46	27.93
石川県	0.168	0.233	2.9%	0.173	0.216	1.7%	175	18.60	18.46	556.86	28.90	29.08
福井県	0.191	0.132	13.2%	0.211	0.032	5.3%	76	15.26	20.39	498.95	32.88	38.21
山梨県	0.147	0.341	3.1%	0.160	0.269	5.2%	96	16.82	18.23	515.94	22.55	27.62
長野県	0.157	0.305	4.8%	0.178	0.183	4.4%	271	15.98	17.49	491.44	23.42	32.21
岐阜県	0.186	0.140	8.6%	0.214	0.006	5.2%	116	19.70	21.25	603.36	34.98	40.91
静岡県	0.171	0.245	6.9%	0.182	0.185	4.4%	248	16.29	18.25	504.35	25.69	29.52
愛知県	0.146	0.346	10.6%	0.178	0.197	4.9%	597	14.46	17.05	454.44	22.36	29.55
三重県	0.183	0.174	8.1%	0.209	0.034	5.5%	271	17.05	22.40	554.24	30.41	39.27
滋賀県	0.168	0.244	12.3%	0.206	0.038	2.2%	227	15.40	21.45	510.35	27.36	40.05
京都府	0.142	0.364	21.5%	0.177	0.191	9.4%	149	11.21	16.54	378.93	21.49	31.21
大阪府	0.149	0.330	24.7%	0.177	0.184	6.4%	481	12.47	18.38	421.46	23.43	32.20
兵庫県	0.169	0.221	19.5%	0.188	0.134	6.3%	333	15.65	20.35	506.97	30.53	34.64
奈良県	0.163	0.257	17.6%	0.191	0.133	4.9%	307	15.13	18.24	478.79	27.83	33.09
和歌山県	0.158	0.284	3.6%	0.162	0.252	7.2%	138	16.81	17.97	513.62	26.48	29.64
鳥取県	0.204	0.089	7.8%	0.227	0.009	9.8%	51	20.29	18.63	595.49	32.55	32.66
島根県	0.176	0.214	2.4%	0.197	0.146	2.4%	42	19.29	17.38	563.33	27.95	27.82
岡山県	0.197	0.141	10.5%	0.187	0.148	4.7%	172	16.74	20.23	530.23	28.58	32.42
広島県	0.163	0.265	15.2%	0.200	0.084	2.8%	289	14.24	20.07	473.81	26.43	35.67
山口県	0.187	0.151	8.7%	0.192	0.083	4.3%	115	17.04	21.45	546.59	32.25	41.79
徳島県	0.139	0.373	8.9%	0.175	0.210	7.1%	56	15.80	16.54	480.03	21.61	29.10
香川県	0.207	0.086	13.3%	0.207	0.076	2.4%	83	16.87	17.61	511.95	31.73	33.13
愛媛県	0.149	0.343	9.9%	0.174	0.176	3.6%	111	14.46	19.41	473.42	21.49	36.20
高知県	0.162	0.266	4.5%	0.188	0.124	6.8%	44	16.48	21.70	536.14	26.84	36.69
福岡県	0.158	0.292	13.5%	0.189	0.134	6.2%	468	14.32	18.74	464.87	24.76	33.69
佐賀県	0.181	0.152	2.0%	0.166	0.196	0.0%	51	18.92	19.12	569.22	36.27	38.20
長崎県	0.148	0.345	7.4%	0.194	0.102	6.3%	95	13.84	19.37	459.47	21.43	36.37
熊本県	0.167	0.257	6.7%	0.194	0.117	5.7%	105	16.24	18.76	507.33	25.64	33.58
大分県	0.168	0.229	4.1%	0.179	0.159	5.1%	98	17.70	17.91	532.76	29.90	36.04
宮崎県	0.177	0.187	8.9%	0.175	0.188	3.6%	56	16.70	17.41	506.61	31.75	33.22
鹿児島県	0.142	0.356	6.6%	0.192	0.144	2.2%	91	14.73	20.11	484.84	22.81	30.19
沖縄県	0.162	0.277	2.9%	0.164	0.265	4.4%	817	15.95	16.56	483.35	25.07	25.80
全国	0.159	0.284	12.5%	0.184	0.159	5.4%	11,224	14.92	18.53	476.51	25.66	32.78

表 4-2 自動車からの排出を含む県別世帯あたり年間 CO₂ 排出量と電化、ZEH 化による削減量

	乗用車CO ₂ 排出量		在来型からのCO ₂ 排出削減量(kg-CO ₂ /年) 家庭用+移動用					
	ICE車排出量kg-CO ₂	EV排出量kg-CO ₂	在来型・ICE・戸建排出量	在来型・ICE・集合排出量	全電化・EV・戸建削減率	全電化・EV・集合削減率	ZEH・EV・戸建削減率	ZEH-M・EV・集合削減率
北海道	1057.5	387.2	8112.4	5235.2	14.5%	11.5%	95.2%	90.9%
青森県	1328.9	486.6	6974.7	5008.4	31.6%	28.9%	93.0%	84.2%
岩手県	1538.8	563.5	7184.5	5218.3	32.5%	30.3%	92.2%	81.7%
宮城県	1488.4	545.0	7134.2	5167.9	32.3%	30.0%	92.4%	82.3%
秋田県	1603.6	587.2	7249.3	5283.0	32.8%	30.7%	91.9%	80.9%
山形県	1983.0	726.1	7628.7	5662.4	34.3%	32.9%	90.5%	76.4%
福島県	1691.5	619.4	7337.3	5371.0	33.1%	31.2%	91.6%	79.8%
茨城県	1940.6	710.6	5611.0	4793.3	33.6%	33.1%	87.3%	71.5%
栃木県	1908.5	698.9	5578.9	4761.2	33.4%	32.9%	87.5%	72.0%
群馬県	1856.6	679.8	5526.9	4709.2	33.1%	32.5%	87.7%	72.8%
埼玉県	900.7	329.8	4571.0	3753.3	26.8%	24.7%	92.8%	86.8%
千葉県	977.0	357.8	4647.4	3829.7	27.4%	25.5%	92.3%	85.7%
東京都	354.5	129.8	4024.8	3207.1	21.8%	18.1%	96.8%	94.8%
神奈川県	629.3	230.4	4299.6	3481.9	24.5%	21.7%	94.6%	90.8%
新潟県	1649.7	604.1	7736.6	5428.3	24.2%	18.3%	92.2%	84.2%
富山県	1852.8	678.5	7939.7	5631.4	25.2%	19.9%	91.5%	82.3%
石川県	1816.9	665.3	7903.8	5595.5	25.0%	19.6%	91.6%	82.6%
福井県	1898.3	695.1	7985.2	5676.9	25.4%	20.2%	91.3%	81.9%
山梨県	1653.8	605.6	5324.1	4506.5	32.0%	31.2%	88.6%	75.7%
長野県	1642.0	601.3	5312.3	4494.6	31.9%	31.1%	88.7%	75.9%
岐阜県	1902.8	696.8	5735.6	4988.6	33.8%	30.0%	87.9%	75.1%
静岡県	1504.5	550.9	5020.4	4205.3	33.6%	31.7%	89.0%	76.2%
愛知県	1316.5	482.1	6710.9	4807.3	27.3%	16.5%	92.8%	86.4%
三重県	1721.0	630.2	6073.3	4750.6	31.9%	28.1%	89.6%	77.4%
滋賀県	1535.3	562.2	5887.5	4564.9	30.9%	26.7%	90.5%	79.8%
京都府	723.2	264.8	5075.5	3752.8	25.7%	18.7%	94.8%	90.5%
大阪府	631.3	231.2	4983.5	3660.9	25.0%	17.6%	95.4%	91.7%
兵庫県	1037.7	380.0	5390.0	4067.3	27.9%	22.2%	92.9%	86.4%
奈良県	1178.6	431.6	5530.8	4208.1	28.8%	23.6%	92.2%	84.5%
和歌山県	1436.1	525.9	5788.4	4465.7	30.4%	25.9%	90.9%	81.1%
鳥取県	1743.9	638.6	7138.3	5234.8	29.5%	20.3%	91.1%	81.9%
島根県	1724.7	631.6	7119.1	5215.6	29.4%	20.1%	91.1%	82.1%
岡山県	1668.2	610.9	7062.6	5159.1	29.1%	19.7%	91.4%	82.7%
広島県	1176.3	430.7	6570.7	4667.2	26.5%	15.0%	93.4%	87.8%
山口県	1357.2	497.0	6751.6	4848.1	27.5%	16.8%	92.6%	85.9%
徳島県	1462.7	535.6	5814.9	4492.3	30.5%	26.1%	90.8%	80.8%
香川県	1432.0	524.4	5784.2	4461.6	30.3%	25.8%	90.9%	81.2%
愛媛県	1080.5	395.7	5432.7	4110.1	28.2%	22.6%	92.7%	85.8%
高知県	1457.0	533.5	5809.2	4486.5	30.5%	26.0%	90.8%	80.8%
福岡県	1138.0	416.7	4747.8	3812.4	31.9%	27.4%	91.2%	82.3%
佐賀県	1634.9	598.7	5244.7	4309.4	34.9%	31.5%	88.6%	74.6%
長崎県	1161.9	425.5	4771.7	3836.3	32.1%	27.6%	91.1%	81.9%
熊本県	1424.7	521.7	5034.5	4099.2	33.7%	29.9%	89.6%	77.8%
大分県	1463.9	536.1	5073.7	4138.4	33.9%	30.2%	89.4%	77.2%
宮崎県	1469.7	538.2	5079.5	4144.1	34.0%	30.2%	89.4%	77.1%
鹿児島県	1244.8	455.8	4854.5	3919.2	32.6%	28.3%	90.6%	80.6%
沖縄県	1395.9	511.2	6415.5	4662.4	15.2%	7.8%	92.0%	86.5%

(*)自動車非保有世帯を含む世帯当たり平均値となっている。

4.3 宇都宮市7地域における地域の家庭・業務用建物とEVの時刻別導入効果の予備的分析

前節4.2では、県単位・月別データを用い、家庭部門へのEVの導入効果を評価した。家庭部門ではZEH化+EV化の効果が大きく、戸建て住宅では在来型住宅+ガソリン自動車から比べ約90%の削減が得られた。地域の電化、ZEH化やEV導入の効果、またEVの充電とPV出力の関係を建物単位だけでなく建物間の融通も併せて考慮し、さらに電源運用への影響を見るためには、少なくとも地域の時刻別電力需給を調べる必要がある。これには、LCSの地域エネルギーフローモデル(2017)[33]にて応用可能である。しかし、これを日本全体に敷衍するには、市町村レベルの建物建築面積データ、エネルギー消費用途別原単位データなどが整備される必要がある。ここでは、予備的分析としてこの地域エネルギーフローモデルを宇都宮市の7地域に拡張適用し、ZEB/ZEHとEVの導入効果を時刻別データに基づいた予備的分析結果を示す。この結果をさらに広域に適用し電気事業者への需要の変化を求めると、電源構成/運用モデルとの接続が可能となる。

4.3.1 宇都宮市の7地域について

予備的分析として取り上げた宇都宮市は416.85 km²、人口52万人、22万世帯の非政令都市としては日本最大である。17の行政区(490町丁目)のうち、人口の約75%が市の1/3に居住する。今回は、既存研究[32]に従い①平松町、②中今泉3、4、元今泉3、7、③梁瀬3、4、④宿郷3、5、東宿郷3、6、⑤桜1、2、3、西1、2、大寛1、一条3、4、旭2、天神2、南大通2、⑥材木町、桜2、小幡1、2、伝馬町、泉町、本町、池上町、江野町、中央1、2、5、旭1、本丸町、大通り、二荒町、南大通1、栄町、中町、仙波町、⑦上戸祭町。中戸祭町、戸祭台、戸祭町、釜、山本1、2、3、山本町、富士見が丘1、2、3、4、八幡台、の中から特性の異なる7地域を取り上げる。

それぞれの地域の建物を、事務所(Ofc)、店舗(Shp)、病院(Hsp)、ホテル(Htl)、学校(Scl)、戸建て住宅(Dhs)、集合住宅(Ahs)の7種に分類する。それぞれの床面積と伊香賀[33]による用途別需要原単位から用途別需要を与える。ここでは試算のため既存研究と同じ2005年時点でのデータを用いた。データがやや古いものの、オプション導入の効果と傾向を見るには十分と考えられる。なお、2016年データによれば、栃木県の平均住宅敷地面積は375m²(東京都では140m²)、持ち家の平均延べ床面積は栃木県では134.2m²、賃貸では48.6m²である。表4-3に各地域の建物面積、人口、世帯を示す。

表4-3 宇都宮市7地域の建物種別面積データ

地域別延べ床面積(m ²)		事務所	店舗	病院	ホテル	学校	戸建て住宅	集合住宅
地目	略号	Ofc	Shp	Hsp	Htl	Scl	Dhs	Ahs
①第1種中高層住居専用地域	HR1	15,339	6,624	3,724	0	1,071	171,806	118,153
②第2種中高層住居専用地域	HR2	19,607	12,977	3,071	0	6,150	106,083	36,198
③第1種住居地域	MR1	34,194	12,730	434	855	653	109,148	4,153
④第2種住居地域	MR2	62,178	83,984	5,053	1,961	34,104	94,614	42,153
⑤近隣商業地域	CmR	18,141	28,659	5,187	2,160	10,911	110,414	18,219
⑥商業地域	CmS	232,249	190,571	20,715	10,093	40,343	71,153	5,203
⑦第1種低層住居専用地域	LR1	33,555	23,437	3,533	0	7,681	689,108	46,985

4.3.2 モデルデータとシミュレーションケース

エネルギーフローは伊藤他[33]と、エネルギー機器の効率やコストなどパラメータはLCS[34]とほぼ同様であり、未利用熱源を除いたのみなのでここでは図4-2にエネルギーフローのみ掲載し、そのほかは省く。

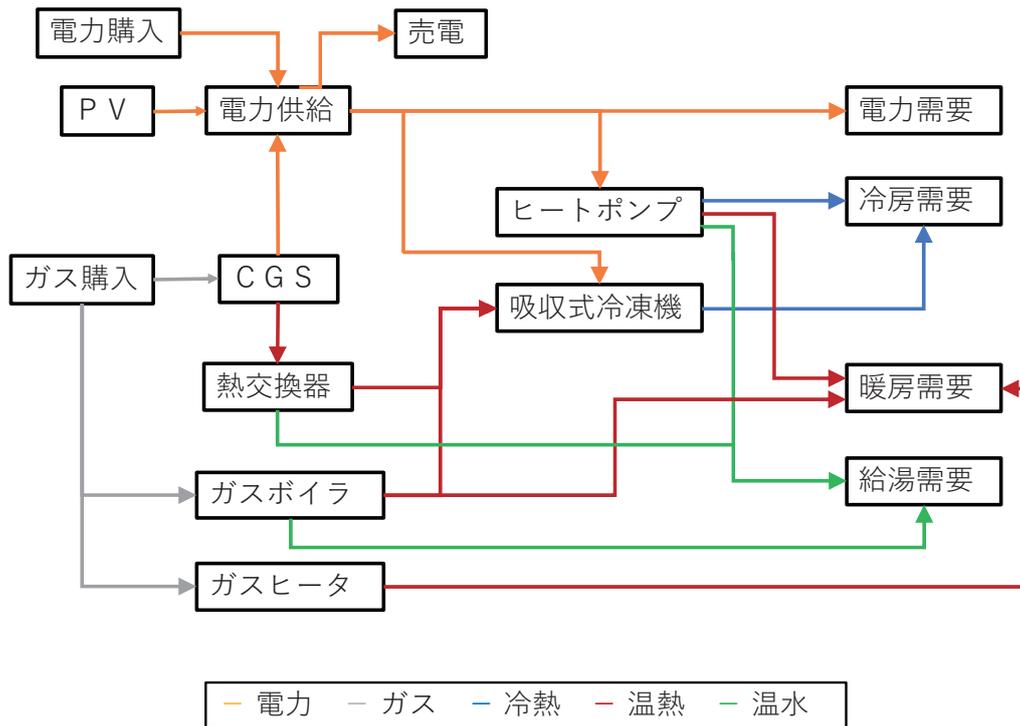


図 4-2 建物のエネルギーフロー[33]

今回の拡張で重要な点は、EV への充電シナリオの設定である。前節 4.2 で述べた自動車 Web アンケートからは平日と休日の走行距離分布が得られ、栃木県での日間平均走行距離は、1 台目は平日 17.82km、休日 20.02km、2 台目は平日 15.19km、休日 15.0km と推計された。電費 7km/kwh とし、さらに 200V 充電系統からは 1 時間強、100V 充電系統では 2.5 時間程度が必要となる。アンケートから、①10:00~18:00 の間に自宅に 3 時間以上駐車、または②出先でも充電可能として 3 時間以上駐車している回答者の割合を求めた。この場合、平日で 97.8%、休日では 87%が該当した。こうして、戸建て住宅では 10:00~18:00 の間に平日 4.7kwh、休日 5kwh、集合住宅では平日 2.54kwh、休日 2.14kwh の電力需要が追加的に発生する。

定式化では、下記のように EV 充電の平準化のためのペナルティ項を新たに導入した。

$$EV_CHG(t+1, r, i) = EV_CHG(t, r, i) + EV_UP(t, r, i) - EV_DN(t, r, i) \quad (4.2)$$

$$CHGPNL = \sum_{t,r,i} pn_UP \times EV_UP(t, r, i) + pn_DN \times EV_DN(t, r, i) \quad (4.3)$$

$EV_CHG(t, r, i)$: 時刻 t 、地域 r 、季節 i の EV 充電需要、 $EV_UP(t, r, i)$: 充電需要増加量、 $EV_DN(t, r, i)$: 充電需要減少量、 $CHGPNL$: EV 充電変動ペナルティコスト、 pn_UP : 充電上昇ペナルティ係数、 pn_DN : 充電減少ペナルティ係数

この $CHGPNL$ をコスト評価関数に加える。ここでは pn_UP 、 pn_DN に電力価格の 20% および 10% を仮定している。これらを 0 とした場合の結果との比較は後に示す。

次に、天候による PV 出力の依存性から、1 年を夏ピーク 3 日間と (夏季、冬季、中間季) × (平日、休日) × (晴天、曇天、雨天) の計 19 季に分割し、各季 1 日 24 時間ごとの給湯、暖房、冷房、動力の用途別需要を推計しモデル化した。シミュレーションシナリオの想定は以下の①~⑨とし、年間総費用最小化により最適解を求めた。

⑩ Cs0:在来型建物と従来型エネルギー機器による運用

電動ターボ冷凍機による冷房、ガスボイラによる暖房および給湯、動力需要は電力事業者からの買電による。

① Cs1:CGS、PV、蓄電池の導入

PVを建物面積1/4まで導入可能とする。この面積は戸建て住宅を除きZEH-M、ZEB化には不足である。

② Cs2:Cs1に加え、建物へのZEH-Oriented、ZEB-readyによる断熱

2015年から全新築住宅がZEH-oriented(20%の一次エネルギー消費削減)となると仮定し、2050年を想定し建物寿命60年として普及率を44%とした。業務用ビルでは建物寿命を50年としてZEB普及率を52%と仮定した。空調、照明、動力の一次エネルギー消費削減率を50%とする。

③ Cs3:Cs2に加え、地域内余剰電力の融通

地域内の需要家間での余剰電力の融通を認める。

④ Cs4:Cs3に加え集合住宅・商業・オフィス・病院が混在する複合ビル開発をシナリオ③に加える。

都市部での大規模開発を除き、建物間の熱融通は普及が進んでいないのに対し、空調需要の一括管理が可能な同一ビル内であれば負荷の平準化が期待できることからこのケースを導入した。

⑤ Cs5:電気事業者への余剰電力販売と地域間のPV発電電力の託送

敷地内に十分なPVを設定できないビルや集合住宅のZEB、ZEH-M化を想定する。郊外地域に最大40haの太陽光発電所を建設し、ここからの託送を可能とするシナリオを設定した。託送料金は高圧(6.6kV)で3.77円/kWh、低圧(200V)で8.57円/kWhとする。

⑥ Cs6:家計保有の乗用車のEV化

昼間3時間以上(PV充電を想定)駐車している利用者を需要家の電力需要に追加する。これ以外のEVは夜間の電気事業者からの充電となる。

⑦ Cs7:コンパクトシティ化

高齢化と人口減を考え、戸建て住宅世帯の最大半数がCs4の複合ビル内の集合住宅に移動し居住空間のコンパクト化が進むシナリオを想定する。

⑧ 託送料金低下

Cs7において、⑤の託送料金を60%、40%、20%に下げた場合をCs7a、Cs7b、Cs7cとする。

⑨ 炭素排出と費用のトレードオフ

この地域モデルでは地域の総費用最小化を行うが、炭素排出と費用のトレードオフを見るため、Cs7aにおいて、評価関数を重み×(CO₂排出量)+(1-重み)×(地域総コスト)として、重みを0.1から0.4まで変える。

4.3.3 シミュレーションの予備的解析結果

ここでは、予備的解析として最小化された7地域の年間総費用とCO₂排出量がシナリオによりどのように変化するかに着目する。図4-3、図4-4に総費用とCO₂排出量のシナリオ間推移を示す。オプションを増やすにつれ、費用低下とCO₂排出削減が同時に起きていることが分かる。

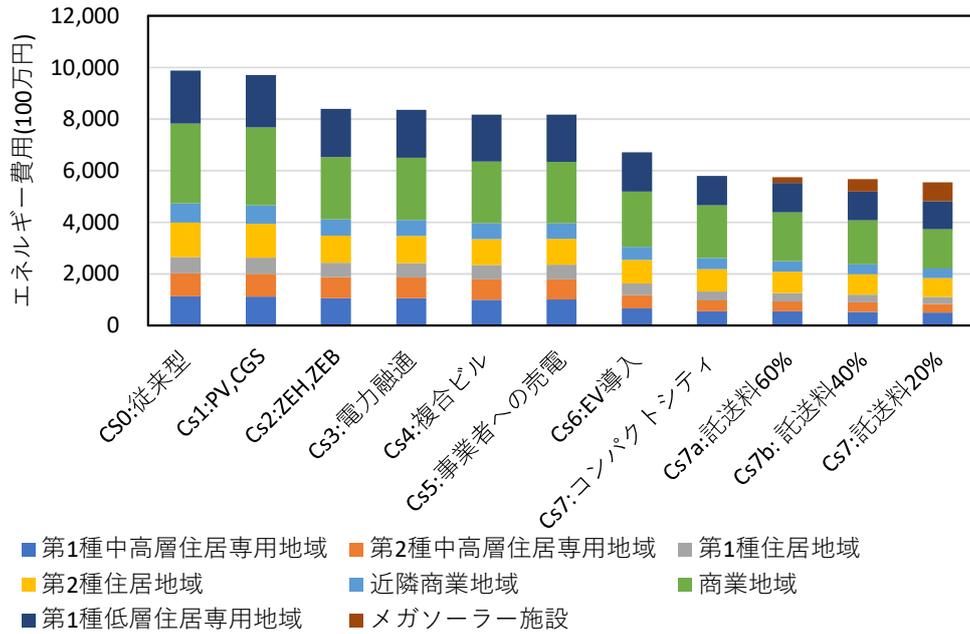


図 4-3 年間エネルギー費用のシナリオ間比較

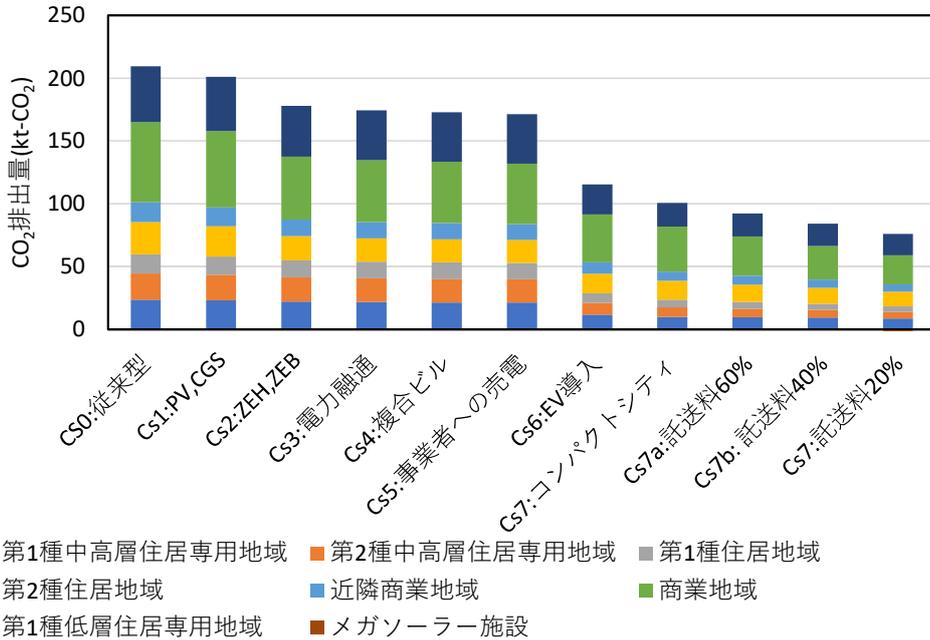


図 4-4 年間 CO₂ 排出量の変化のシナリオ間比較

いずれも、ZEH/ZEB 化、EV 導入、コンパクトシティ化で大きな低下が発生している。CO₂ 発生量は、託送料を 60%、40%、20% と下げるにつれ低下が続き、Cs7 で Cs0 の 48% まで低下する。この託送料低下の Cs7a-Cs7c ではメガソーラーの導入が拡大し Cs7c では Cs0 の 35% まで低下する。

次に、⑨炭素排出と費用のトレードオフを見る。炭素排出重みを変えると図 4-5 のように蓄電池容量が増え、重み 0.3 以上では PV 導入も上限に達した。重み 0.1 では年間総費用は Cs7 から約 8%増加した一方、CO₂ 排出量は Cs6 からは 39%削減、Cs0 からは約 70%の削減が果たされた。

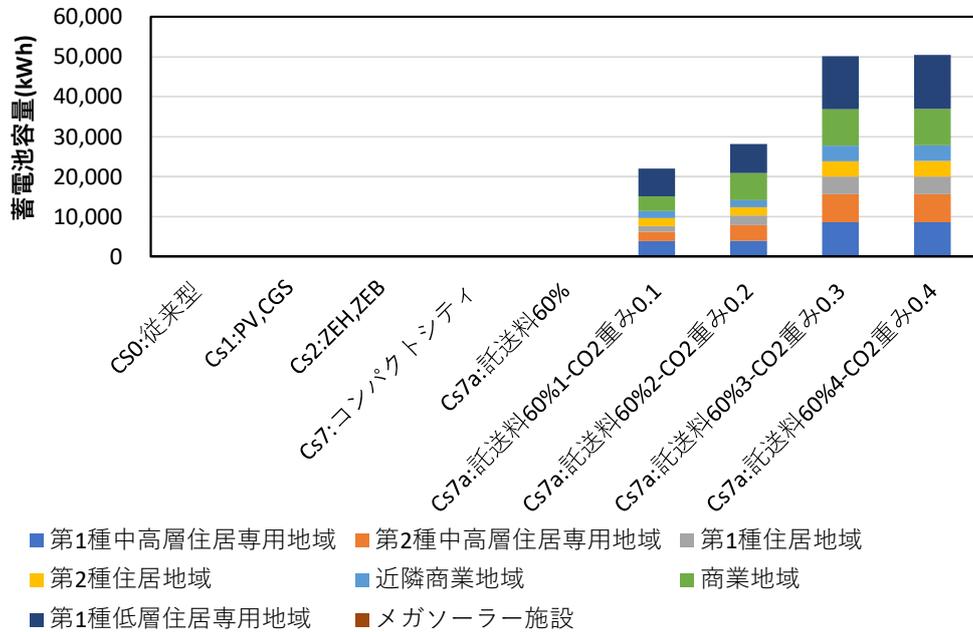


図 4-5 炭素排出重みによる蓄電池容量の増加

図 4-6、図 4-7 には時刻別 EV 充電需要合計値の推移を示す。図 4-7 では式(4-2)(4-3)の pn_{UP} 、 pn_{DN} とも 0 とし EV 充電の変動ペナルティを外している。この場合、EV 充電需要が特定の時間に集中し、電気事業者の送電容量に短期的な影響を及ぼしうる。すなわち、EV の拡大導入には EV 充電のための地域全体的な管理システムが不可欠といえる。

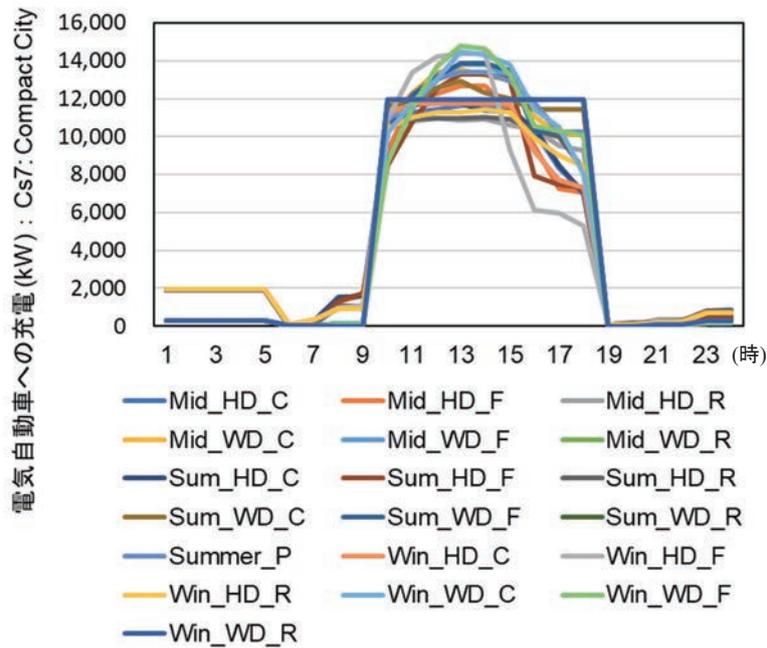


図 4-6 EV 充電需要 (Cs7:平準化管理あり)

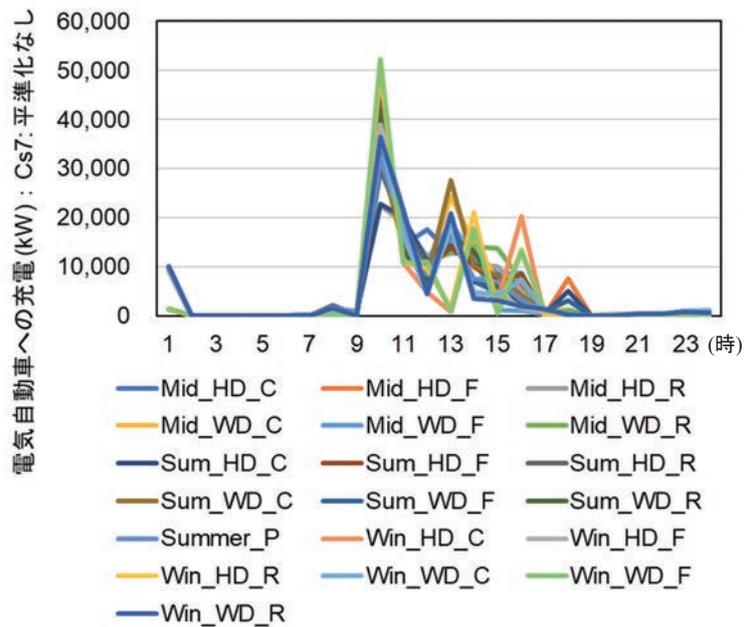


図 4-7 EV 充電需要 (Cs7:平準化管理なし)

4.3.4 宇都宮モデルの知見

ここでは、予備的分析として宇都宮 7 地域に対して既存の地域エネルギーモデルを拡張し、ZEB/ZEH 化と EV 導入、さらにコンパクトシティ化ケースの評価シミュレーションを行った。限られた地域ではあるが、ZEH/ZEB 化により CO₂ 排出は 3 割削減、EV 化により 45% の削減が果たせ、集合住宅に半数が移動するコンパクトシティ化では 56% の CO₂ 排出削減がなされた。さらに地域外からの PV 発電の託送による ZEH-M/ZEB 化を実現可能とすると、排出削減は 65% に高まった。この場合託送料金は約 6 割に低下させた。CO₂ 排出低下と費用低下はここまでは補完的であったが、両者のトレードオフを見るための炭素排出重みづけを評価に加えると託送量が増え、併せて PV の増加と蓄電池容量の導入増加が見られた。この場合、CO₂ 排出量は CsO の約 30% にまで低下した。

本モデルは予備的なものであり建築物床面積データがやや古いなどの問題があるものの、今後につながる以下の知見を与えている。第一に、将来人口は減少するため、実際の排出量はこの予備モデル以上に減少すると考えられる。第二に、電気事業者の CO₂ 排出原単位が低下するなら、シミュレーションの CO₂ 排出量も併せて減少する。第三に、ZEH-M、ZEB は CO₂ 排出削減に効果大きい、「敷地内に年間合計純一次エネルギー需要を 0 とするだけの創エネ設備を持つこと」という条件は容易ではなく、やや離れた地域に設置された PV 設備との連携で ZEH-M、ZEB が認定されることが望ましい。このためには託送料金の低下あるいはこれを補う方法が必要である。ことに系統容量に対して接続が過大になると託送料金には上昇圧力がかかる。第四に、EV 導入が普及すれば、充電スケジュールの広域的マネジメントは極めて重要になる。どの程度の地域範囲ごとにどのような管理方式が望ましいかは、今後の研究課題となろう。

5. ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビルディング）の状況と普及率について

5.1 ZEB の状況

業務用建物については、「エネルギー基本計画」（2014年4月閣議決定）において、「建築物については、2020年までに新築公共建築物等で、2030年までに新築建築物の平均でZEBの実現を目指す」とする政策目標が掲げられている。これによって、低炭素化が期待される。

ZEBの定量的定義は、経済産業省資源エネルギー庁による「ZEBロードマップ検討委員会とりまとめ」[36]（平成27年12月）および「平成30年度ZEBロードマップフォローアップ委員会とりまとめ」[37]（平成31年3月）によると、下記のとおりである。

- ・「ZEB」以下の①～②のすべてに適合した建築物[36]
 - ① 再生可能エネルギーを除き、基準一次エネルギー消費量から50%以上の一次エネルギー消費量削減
 - ② 再生可能エネルギーを加えて、基準一次エネルギー消費量から100%以上の一次エネルギー消費量削減
- ・「Nearly ZEB」以下の①～②のすべてに適合した建築物[36]
 - ① 再生可能エネルギーを除き、基準一次エネルギー消費量から50%以上の一次エネルギー消費量削減
 - ② 再生可能エネルギーを加えて、基準一次エネルギー消費量から75%以上100%未満の一次エネルギー消費量削減
- ・「ZEB Ready」再生可能エネルギーを除き、基準一次エネルギー消費量から50%以上の一次エネルギー消費量削減[36]
- ・「ZEB Oriented」建築物の延べ面積が10,000 m²以上の建築物[37]
 - 以下の①及び②の定量的要件を満たす建築物とする
 - ① 該当する用途毎に、再生可能エネルギーを除き、基準一次エネルギー消費量から規定する一次エネルギー消費量を削減すること
 - A) 事務所等、学校等、工場等は40%以上の一次エネルギー消費量削減
 - B) ホテル等、病院等、百貨店等、飲食店等、集会所等は30%以上の一次エネルギー消費量削減
 - ② 「更なる省エネルギーの実現に向けた措置」として、未評価技術を導入すること

Sii 一般社団法人 環境共創イニシアチブの平成 31 年度 ネット・ゼロ・エネルギー・ビル (ZEB) 実証事業における ZEB リーディング・オーナー一覧[36]をマッピングしたものが、図 5-1 である。

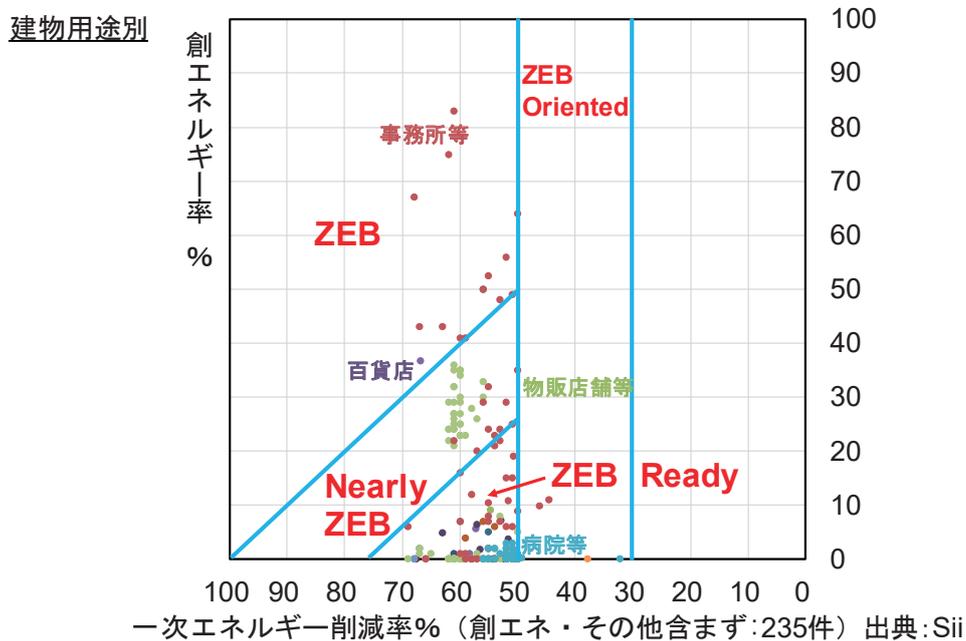


図 5-1 ZEB 達成度 [38]

ZEB 等の登録件数は 300 件に到達しておらず、ZEB リーディング・オーナーのうち「ZEB」認定されているものは付録：付表 1 の 13 件のみである。現在のパッケージ化された空調の技術で省エネ基準の 4 分の 1 近くまで省エネできることが分かる。照明に関しても LED に代替すること等で、4 分の 1 以上まで省エネできることが分かる。

5.2 業務用建物エネルギー原単位と床面積の地域差

Sii 一般社団法人 環境共創イニシアチブのエネルギー管理システム導入促進事業は、平成 23 年度エネルギー管理システム導入促進事業費補助金によりエネマネオープンデータ公開サイト (<https://www.ems-opensdata.jp/>) [39]を構築した。以下、このデータベースを BEMS-DB と略記する。総登録件数は、6,056 件 (2012 年～2014 年) である。業種別一件につき 8,760 時間 (1 年間) のエネルギー消費データが格納されている。日本不動産研究所によると 2019 年 1 月現在のオフィスビルストック [40]は、全都市計で 12,969 万 m^2 (10,605 棟) である。コンビニ等の店舗が含まれていることを考慮してもおよそ 60%の建物のデータを格納しているということになる。

参照データのある BEMS-DB の宿泊業について、季節ごとの関東の 5,001～10,000 m^2 における 24 時間電力需要データを算出したものを図 5-2 に示す。伊香賀[35]による関東ホテル季節別 24 時間電力需要曲線図 5-3 では、ホテルのチェックイン時間帯の電力需要の伸び率が伸びており BEMS-DB のデータとは異なるパターンを示す。年間の原単位で見ると、BEMS-DB は 135.9 $[kWh/m^2 \cdot 年]$ に対し、伊香賀 [35]は、172.9 $[kWh/m^2 \cdot 年]$ となる。BEMS-DB の方が年間 21%低いエネルギー消費を与える。なお図 5-4 の伊香賀のエネルギー需要データでは冷房負荷がオレンジ色の線で別掲されて空調方式の差をある程度推計可能となっている。

付録2の付図2に、日本全体のホテル、病院、学校についてエネルギー消費原単位の推移 (EDMC) [41]を示した。BEMS-DB の全国平均で見ると学校の延床面積は病院より小さいが、EDMC における学校の日本の延床面積合計値は病院、ホテルの 3 倍程度に達する。そのため原単位を病院、ホ

テルと比較するとかなり低い値で推移する。集計された建物エネルギー消費推計への原単位法の適用では、建物種類と原単位の取り扱いについて注意が必要となる。

図 5-5 に、日本の病院、学校、ホテルについて延床面積と電力消費量の散布図と線形回帰分析結果を示す。線形回帰式の当てはまりの良さは、電力消費原単位の規模に対する安定性を示唆する。他方、両対数回帰分析は電力消費の床面積に対する規模の経済性の存在を示す。回帰分析の結果を表 5-1 にまとめる。

線形回帰式の結果は、ホテル ($R^2=0.94$)、病院 ($R^2=0.76$) はいずれも切片の寄与が小さく原単位の安定性が示唆されている。ホテル、病院とも大規模施設がサンプル中に含まれているが、これを除いても回帰係数に大きな差はなく、この点からも規模による差は小さく、大規模施設や複数建物の集計データに対しても原単位と床面積からの推計手順が妥当性を持つと言える。この点は、両対数回帰分析の結果と比較するとより明らかになる。表 5-1、図 5-6 にあるように、ホテルでは床面積に対する回帰係数が 1 未満であり規模の効率性が示唆されるものの、 R^2 は線形回帰分析結果より大きく低下しており、このモデルを採択する必然性は見いだせない。病院では両対数でも床面積の回帰係数が 0.98 であり規模の中立性が示唆される。

これに対して学校では、線形回帰分析の R^2 は 0.46 と低く、図 5-6 の両対数回帰分析は $R^2=0.66$ とやや良い結果を与えている。回帰係数は 0.88 であり、エネルギー消費に関する規模の経済性が示唆される。

最後に、エネルギー消費量の高い医療業（病院）、学校教育、宿泊業（ホテル）について、地方別（北海道、東北、関東、中部、関西、中国、四国、九州・沖縄、全国）について、延床面積ごとに電力消費原単位とその標準偏差を算出した（表 5-2）。最終段の延床面積のセルに「全国」と記載して日本エネルギー・経済統計要覧（EDMC）2019 [41]の全国データを参照値としてまとめた。データのばらつきを確認するため、変動係数も併せ示した。関東の学校などで高めの数値を示している。また、延床面積が大きくなるにしたがって電力の年間消費原単位 [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$] が小さくなる傾向があることから、学校については地域間で比較しても規模の経済性が働いていることが示唆される。

5.3 ZEB の将来普及率に関する考察

事業用建物では、法定償却年数は 50 年とされている。

付録 1 の付図 1 より 2020 年から全ての新築建物が ZEB 化されたとしても、全建物ストックに占めるシェアは、業務建物（寿命：50 年）では 2030 年 18.6%、2050 年 52.0%となる。

現実には、平成 30 年建築物ストック統計 法人等の非住宅建築物 延べ床面積（竣工年代・構造・用途別） [42]と比すると、ZEB は日本全体の 0.05%にとどまる。

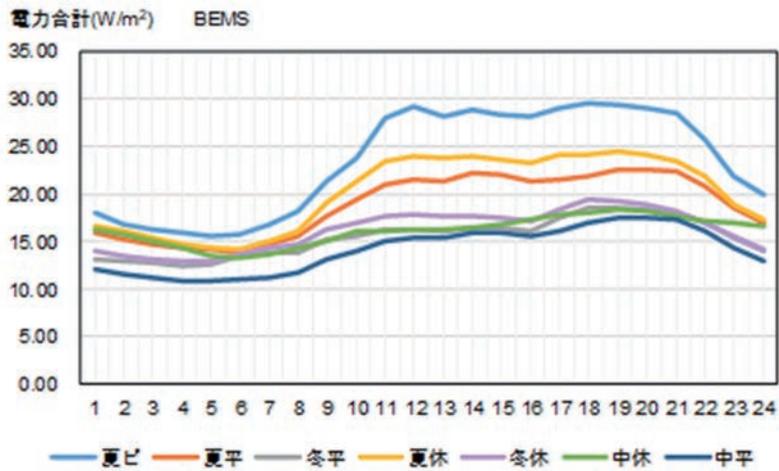


図 5-2 BEMS-DB 関東 宿泊業（ホテル）季節別 24 時間電力需要曲線 [39]

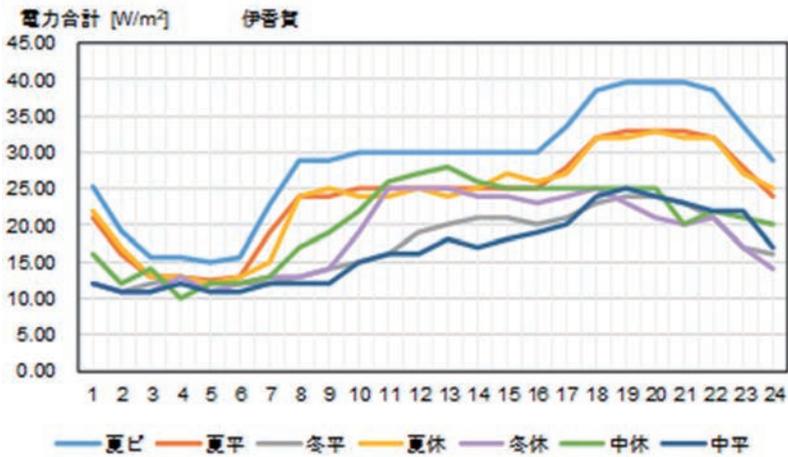


図 5-3 伊香賀データ 関東ホテル 季節別 24 時間電力需要曲線 [35]

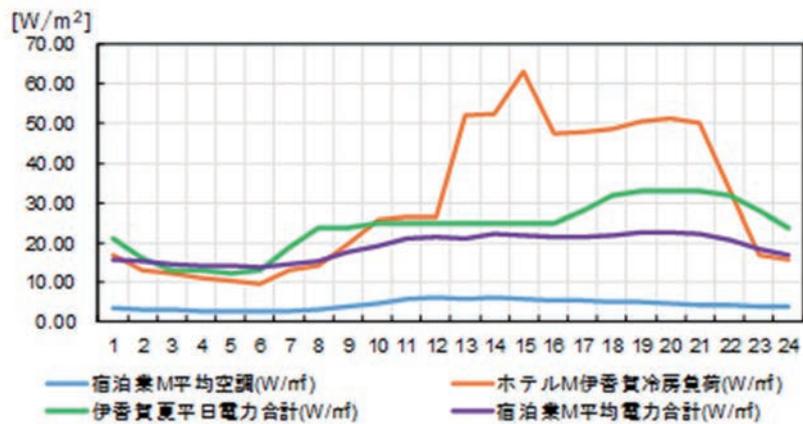


図 5-4 夏平日の冷房負荷と空調の 24 時間電力需要曲線 [35,39]

表 5-1 回帰分析まとめ

	線形回帰分析			両対数回帰分析		
	病院	学校	ホテル	病院	学校	ホテル
切片	128.2	7.02	189.0	-1.68	-1.58	0.21
(t-値)	2.31	0.06	4.40	-4.41	-2.13	0.60
床面積	0.15	0.08	0.12	0.98	0.88	0.76
(t-値)	21.26	6.93	37.98	21.45	10.32	17.82
修正済R ²	0.76	0.46	0.94	0.76	0.66	0.77
データ数(N)	143	56	94	143	56	94
	線形回帰分析(最大床面積建物除)					
	病院	学校	ホテル			
切片	106.0	--	145.2			
(t-値)	1.65	--	2.66			
床面積	0.15	--	0.13			
(t-値)	16.15	--	18.15			
修正済R ²	0.65	--	0.78			
データ数(N)	142	--	93			

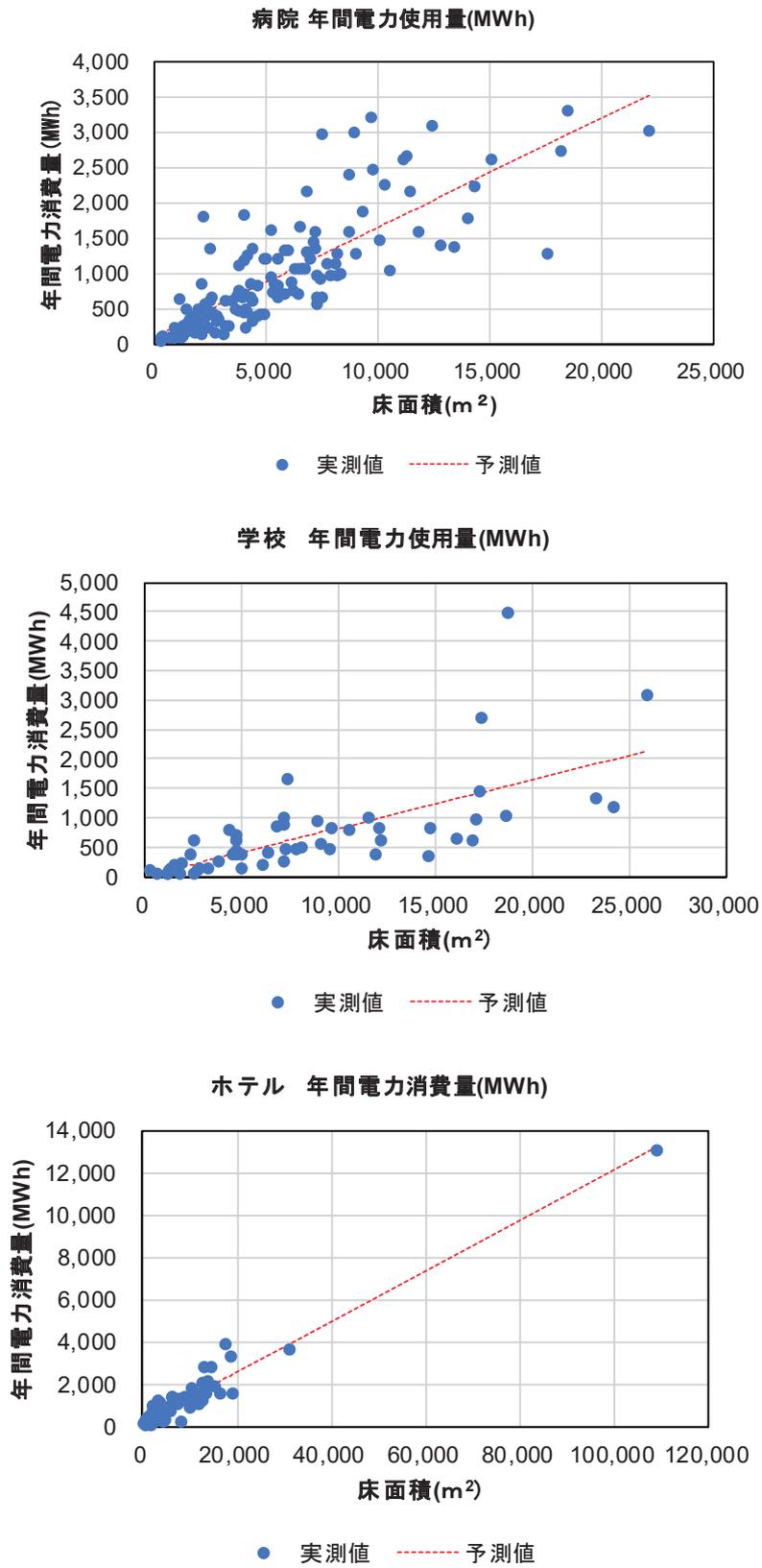


図 5-5 日本の病院、学校、ホテルについて延床面積と電力消費量の線形回帰分析 [39]

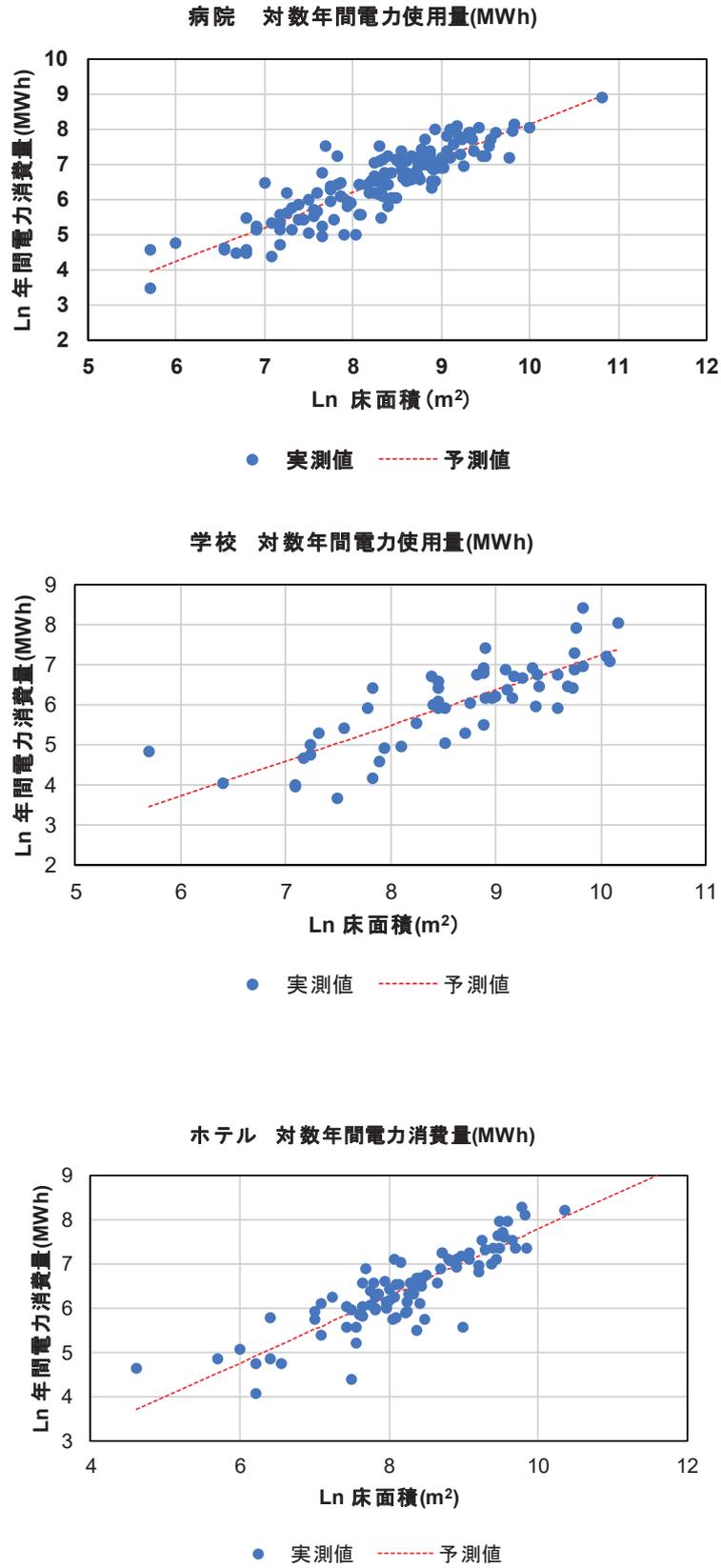


図 5-6 延床面積と電力消費量の両対数回帰分析 [39]

表 5-2 BEMS データ：業務用年間電力使用原単位 [kWh/m²・年]と床面積の地域差 [39,41]

業務部門	医療業（病院）	学校教育	宿泊業（ホテル）
北海道平均			
延床面積 [m ²]	8,100	0	13,200
原単位 [kWh/m ² ・年]	292.0	-	115.3
原単位の標準偏差	38.4	-	0.0
変動係数（標準偏差/平均値）	0.13	-	0.00
東北平均			
延床面積 [m ²]	7,800	3,967	4,000
原単位 [kWh/m ² ・年]	136.3	81.9	138.9
原単位の標準偏差	41.0	58.9	14.8
変動係数（標準偏差/平均値）	0.30	0.72	0.11
関東平均			
延床面積 [m ²]	4,235	10,508	8,031
原単位 [kWh/m ² ・年]	173.8	98.4	234.7
標準偏差	82.4	85.7	175.6
変動係数（標準偏差/平均値）	0.47	0.87	0.75
中部平均			
延床面積 [m ²]	7,775	14,650	5,548
原単位 [kWh/m ² ・年]	228.4	40.4	177.1
原単位の標準偏差	166.9	15.9	94.4
変動係数（標準偏差/平均値）	0.73	0.39	0.53
関西平均			
延床面積 [m ²]	6,027	11,144	5,154
原単位 [kWh/m ² ・年]	191.5	88.6	160.3
原単位の標準偏差	112.2	55.7	37.7
変動係数（標準偏差/平均値）	0.59	0.63	0.23
中国平均			
延床面積 [m ²]	1,533	6,100	3,840
原単位 [kWh/m ² ・年]	239.3	92.6	153.8
原単位の標準偏差	60.9	11.5	70.6
変動係数（標準偏差/平均値）	0.25	0.12	0.46
四国平均			
延床面積 [m ²]	5,783	0	10,850
原単位 [kWh/m ² ・年]	180.2	-	182.7
原単位の標準偏差	64.5	-	39.3
変動係数（標準偏差/平均値）	0.36	-	0.22
九州・沖縄平均			
延床面積 [m ²]	6,134	5,020	7,457
原単位 [kWh/m ² ・年]	148.2	73.2	169.8
原単位の標準偏差	60.3	23.5	82.9
変動係数（標準偏差/平均値）	0.41	0.32	0.49
全国（BEMS）			
延床面積 [m ²]	810,500	558,400	6,773
原単位 [kWh/m ² ・年]	180.9	88.9	190.0
原単位の標準偏差	102.8	67.8	123.2
変動係数（標準偏差/平均値）	0.57	0.76	0.65
全国(EDMC)			
延床面積 [m ²]	1,158,000	3,710,000	89,900,000

6. 低炭素社会のまちづくりのための地域のスマートシティ成果レビュー

本章では、評価データベースが未確立な第2章図2-6のフレームE段階の「スマート化による省エネルギーやCO₂排出削減」の定量的効果を、既存のプロジェクト報告書から抽出する。次世代・エネルギー社会システム実証事業[43]では社会的実験として「スマートシティ」プロジェクト4件を実施し、一般社団法人新エネルギー導入促進協議会[44]が事業の成果を報告書として取りまとめている。これらは、エネルギー連携実現のための技術課題や需要家応答（DR）、電力融通の評価など、第4章までに述べた調査が含まない課題のデータを提供する。しかし各プロジェクトの取り組み方は異なっており、プロジェクト間の直接的な比較は難しい。本章では、各「スマートシティ」プロジェクトの内容と知見を纏める。

6.1 横浜スマートシティプロジェクト[43,44]

横浜スマートシティプロジェクトの特徴としては、「広域大都市型」ということである。経済産業省に提出された最終的なCO₂削減率の集計結果は、2005年度比2014年度で29%である。後継プロジェクトとして「横浜スマートビジネス協議会」がある。住宅約4,000戸、大規模ビル約10棟を対象とした大規模な実証で、HEMSの社会実証、BEMSのDR実証、大型蓄電池SCADAを用いた仮想発電所（VPP）の実証、EVのDR実証を実施した。（付録3の付表2参照）

6.2 愛知県豊田市における『家庭・コミュニティ型』低炭素都市構築実証プロジェクト[43,44]

愛知県豊田市における『家庭・コミュニティ型』低炭素都市構築実証プロジェクトの特徴としては、「戸別住宅型」ということである。経済産業省に提出された最終的な集計CO₂排出削減率は、2020年度で2005年度比30.1%である。後継プロジェクトとして「豊田市につながる社会実証推進協議会」がある。エネルギー情報マネジメントシステム（EDMS）の研究開発：社会コストを抑えながら需要サイド、地域全体でのグリーンエネルギーの最大限の有効活用を図る。また豊田市における木質ペレットの地産地消スキームを構築した。（付録3の付表3参照）

6.3 けいはんなエコシティ次世代エネルギー・社会システム実証プロジェクト [43,44]

けいはんなエコシティ次世代エネルギー・社会システム実証プロジェクトの特徴としては、「住宅団地型」ということである。経済産業省に提出された最終的な集計CO₂排出削減率は、2020年度目標では2007年度比40%である。後継プロジェクトとして「スマートけいはんなプロジェクト推進協議会」がある。けいはんなエコシティでは、生活の質や利便性を損なうことなく効率的な利用を図るエネルギーマネジメントの構築を目指した。住宅約700戸等を対象としたDR実証を実施。電力会社による家庭向け省エネコンサルを実施した。（付録3の付表4参照）

6.4 北九州スマートコミュニティ創造事業 [43,44]

北九州スマートコミュニティ創造事業の特徴として「中核都市型」ということがある。経済産業省に提出された最終的な集計CO₂排出削減率は、2014年度で2005年度比51.5%（東田地区）である。後継プロジェクトとして日本製鉄株式会社（2020年現在）の特定供給エリアで実証した「超スマート社会（Society5.0）北九州連携推進協議会」がある。コジェネをベースロード電源と見立て、需要家180戸において、需給状況に応じて電力料金を変動させるダイナミックプライシングの実証を実施した。（付録3の付表5参照）

6.5 スマートシティにおけるエネルギー連携に関する考察 [43,44]

スマートシティプロジェクト特有の事項として、社会実験としてのデマンドレスポンスの導入、モビリティの活用、熱・水素によるエネルギー連携がある。それらの特徴を下記の表 6-1～表 6-3 に纏めた。スマートシティの成果はなお記述的なものにとどまっており、何らかの政策提言を導くには至っていないが、技術オプションとして重要な位置づけにあることが示唆されている。

6.1 節から 6.4 節以外に実施されたスマートシティプロジェクトとして、表 6-4 などがある。実証期間終了後については運営状況が不明なプロジェクトも見られ、自立した持続可能なスマートシティとしての管理運営は、今後の重要な課題である。

表 6-1 デマンドレスポンス (DR) の種類と概要 [43,44]

	横浜市	豊田市	けいはんな	北九州市
種類	① PTR (Peak Time Rebate) 方式 ② CPP (Critical Peak Pricing) 方式	CPP (Critical Peak Pricing)	価格誘導型 DR	需要家 180 戸において需給状況に応じて電力料金を変動させるダイナミックプライシング CPP と CBP (Critical Bottom Pricing)
概要	① 特定の高需要日の特定時間において電気料金のベースラインからの消費削減に対して割引を行う方式 ② 不明	平常時の電気料金は通常料金であるが、特定条件下でより高い単価が課される	電力需要の抑制効果と電力使用実績に基づいた個別の省エネコンサル効果を検証	ダイナミックプライシングに連動した ADR (自動化デマンドレスポンス)
成果	① 最大ピークカット 22% ② 不明	2014 年度平均価格弾性力は 0.22 (単価変化 1% あたり 0.22% 変動)	DR による電力削減平均 21.3%	ピークカット 20%

表 6-2 モビリティ活用の種類と概要 [43,44]

種類	EV シェアリング	ワンマイルモビリティ	EV 充電管理	EV、PHV の導入
地域	横浜市	豊田市	けいはんな	北九州市
概要	車輻からの放電技術を用いた EV、ソーラー電力充電システム、EV 予約配車システムを利用したエネルギーマネジメントシステムの開発と実証事業（オリックス自動車、日産、日立）	超小型 EV シェアリング 事前に車両確保ができ、使いたいときに使えるように需要予測による需給管理がされている ワンウェイ利用ができる	EV の位置、蓄電池残量、走行データ等を収集し、CEMS と連携して充電電力による抑制・促進効果を検証	「EV 用充電・蓄電システム」と「エコドライブ見える化システム」を統合した「エコドライブ総合支援システム」を開発
成果	「目標 Well to Wheel CO ₂ 削減 15% 以上を達成した」	会員 3,000 名以上	EV102 台導入	再生可能エネルギーの EV への充電により CO ₂ 35% 削減

表 6-3 地域におけるエネルギー連携の実証 [43,44]

エネルギー連携	熱	水素
地域	豊田市	北九州市
概要	熱の共有（廃熱利用と蓄熱輸送システム）豊田市にあるトヨタ自動車元町工場において、その近接工場を工場団地として、機器を導入し、蓄熱及び熱輸送による廃熱共有と地域 EMS と連携した需給の最適化の実証を行った	水素/燃料電池を活用した地域エネルギー需給バランスの調整 太陽光発電による余剰電力を水素として貯蔵し、CEMS と連携した 3kW 燃料電池で再利用 新日鐵の製鉄プロセスにおいて生じる副生水素を活用して、水素供給利用組合が地区内にパイプラインを設置し地域内店舗、公共施設、住居（7 戸）に水素を供給する

表 6-4 エネルギー連携事業の社会化事例 [43,44]

エネルギー	電気に着目した社会化事例	熱に着目した社会化事例
社会化事例	【複合市街地】 柏の葉スマートシティ（実証済）	【複合市街地】 田町スマエネパーク（運営中） 東京ガス
	【戸建住宅】 Fujisawa サスティナブル・スマートタウン（運営中）	【地域】 長崎県島原市（実証中） 工場の未利用熱と温泉
	【集合住宅】 パークタワー西新宿エムズポート（現状不明） HEMS	【地域】 栃木県下都賀郡（現状不明） 地中熱

7. 結論と今後の展望

本提案書では、特に民生部門と家庭用輸送用エネルギー需要に着目し、将来の地域エネルギーシステムにおける家庭用エネルギー需要と輸送用エネルギー需要が、どのようにスマート化されることで変化し、低炭素化を果たすかについて定量的評価を行った。はじめに、文献から地域別エネルギー需要と太陽電池の普及の効果を調べ、これに自動車の利用状況のアンケート調査結果を適用し、ガソリン自動車電動化されることの効果を地域別に調べた。この結果、戸建住宅では ZEH 化のための PV 導入必要量は最大でも 10kW 以下であり、実現可能性が高い一方、集合住宅では現在の規定では困難であると予想されることが分かった。

戸建て住宅の ZEH 化と EV 導入の効果は、CO₂ 排出削減率において既存住宅とガソリン自動車の組み合わせの 85%~95% に達する。ただし、これは家庭に年間一次エネルギー消費と等しいだけの PV が設置され、かつ余剰電力が全て系統電力にゼロ排出電源として供給され、既存電源を置き換えるという条件を前提とする。現実には、まず蓄電池が多量に必要となること、また時間帯によっては系統電力がすべての余剰電力を受け入れられない出力抑制の可能性を考慮しなければならない。集合住宅では ZEH 化のための PV 導入が困難であるとしても、家屋の断熱と EV 化により沖縄を除き 17%~35% の削減が見込める。残りの排出量はもっぱら電源系統からのものであるため、電源系統の CO₂ 排出原単位が削減されるとさらに大幅な改善が見込める。

EV を含む異種需要家間の連携と天候を考慮した PV の寄与と電気事業者への影響などは、4.3 節に示した時刻別の家庭部門の拡大と電源構成の統合評価によって明らかにされる。今回の試算では、EV 充電の広域管理の必要性も示された。

ZEB も大きな CO₂ 削減ポテンシャルを持つものの、実施例が極めて限られている。現状では ZEH-M と同じく創エネ設備を敷地内に設置可能なケースが限られるため、断熱化と照明の LED への置き換えおよび最新空調機器への交換が技術選択として挙げられている。事例分析では、業務用建物における LED と空調システムの省エネ効果はそれぞれ単独で 60~80% までに達する。

2005 年付近のエネルギー消費原単位と最新の原単位の比較を行うと、近年導入例の多い HEMS および BEMS など管理システムの導入効果の大きいことが見て取れた。ただし、報告された事例数は業務用ビル全体に比べれば限られており、今後は普及の加速が必要である。

スマートシティに関しては、既往の報告書の書き方に統一性がなく厳密な比較は難しいが、需要者応答の導入で約 30% の省エネが果たされている点が観察された。ただし、これらの事例では、社会実験対象の建物が現在どの程度 ZEH/ZEB 化済みなのか不明なため、これらの削減効果を第 4 章までの結果にどの程度上乘せ可能であるかについては、現段階では結論を下せない。

8. 政策立案のための提案

本提案書では、民生部門と家庭用輸送用エネルギー需要に着目し、両者の統合化がCO₂排出削減に大きく寄与しうることを示した。4.3節では、その統合化により地域のエネルギー費用とCO₂排出を同時に削減しうることを示した。この実現のために以下の政策課題が提案できる。

1. ZEB/ZEH化は民生部門のCO₂排出削減に大きな潜在性を持つが、現状の新築時の導入率はまだ低く、40年以上におよぶ建物寿命を考慮すると2050年でも全体としてはその潜在性の実現は一部にとどまる懸念があり、導入のための推進策が不可欠である。
2. ZEB/ZEH化は現在の規定では集合住宅や商業ビルでも敷地内にPVなど創エネ設備が設置されねばならない。地域外のPV設置も含め認定することはZEH-M、ZEBの推進につながると考えられる。
3. 上記2.の推進は託送料金の設定に対して感度が大きいことが示された。ただし、ある程度価格を下げてても効果は飽和した。現在、送配電線の利用形態、費用評価と制度設計は議論が進行中のため、この料金設定は今後、費用と環境のトレードオフから慎重に扱うべき課題となろう。
4. 走行距離の短い日常的な家庭用用途に対しEVはガソリン自動車の代替手段となりうる。しかし大規模な普及のためには、単なる充電拠点の拡大だけでなく、充電需要の集中を避けるための広域的な管理システムが必要である。各EVの充電需要を満たしつつ全体として効率的な充電を実現するためのシステム開発が不可欠である。
5. 本評価ではZEH/ZEH-M化とEV化は、もし余剰電力が全量系統電力に買い取られ既存電源を置き換えるなら90%前後のCO₂排出削減をもたらす。この潜在値がどこまで達成可能かどうかはZEH/ZEH-Mの普及とともに、地域民生エネルギーシステムと輸送部門、および電源構成モデルの統合評価の開発を必要とする。
6. ZEBはCO₂排出削減策として有効であるが、現状では認定件数が極めて少ないことに見られるように、施工主にはインセンティブが小さい。この差を埋めるには強力な制度的な推進策が望まれる。
7. 需要家応答(DR)は省エネルギーに寄与する手段である。ただし「慣れ」によってその効果が時間とともに薄れるか否かは継続的な観測が必要である。

付録1 建物の寿命と残存率に関するモデル化

将来の ZEH の普及率を予測するには、新築建物の年齢と残存率の関係を定期化する必要がある。鎌谷ら (2011)^dは、建物の寿命を「同年に建てられた住宅の残存率が 50%を切る年数」とした。すなわち 40 年経過しても半数は残存しているといることになる。

ZEB 普及率の推計のためには基準となる 2015 年 (計算初期値には 2020 年も考えられる) 以降の新築建物が 2030 年あるいは 2050 年時点でどれほどのシェアを持っているか推計する必要がある。

ここでは、設備などの寿命にはしばしばワイブル分布が仮定され、残存曲線はその分布関数で扱う。ここでは、ワイブル形状パラメータを 2 とした片側正規分布関数形を仮定する^e。θ は建設年、x は評価年次である。θ=x=0 なら f(x)=1 である。なお、x≥θ とする。

$$F(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\theta}{s}\right)^2}$$

あるいは建築後の経過年数 z を用い、 $F(z) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{s}\right)^2}$ となる。

寿命を T とすると、 $F(T)=0.5$ である。

このことから、 $F(T) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T}{s}\right)^2} = 0.5$ なので、 $(T/S)^2=2 \cdot \ln 2$ あるいは $S=T/(2 \cdot \ln 2)^{0.5}$ となる。

ここで、θ 年の新築建物数を g(θ) とすると、時点 t の全住宅ストック数は

$$\int_{-\infty}^t F(t-\theta)g(\theta)d\theta$$

このうち、基準年 θ=0 以降に建てられた建物の数は

$$\int_0^t F(t-\theta)g(\theta)d\theta$$

となるので、両者の比をとることで基準年以降の新築建物の全ストックに対するシェアが得られる。簡単のため、 $g(\theta)=A$ と一定とする。

$$\int_{-\infty}^t F(t-\theta)Ad\theta = \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\theta}{s}\right)^2} Ad\theta$$

これは、 $x = \frac{\theta-t}{s}$ と置換すると、 $\sqrt{2\pi} \frac{S}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{1}{2}x^2} Adx = s \frac{1}{2} \sqrt{2\pi} A$ となる。同様に、

$$\int_0^t f(t-\theta)Ad\theta = \int_0^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\theta}{s}\right)^2} Ad\theta = A\sqrt{2\pi} \frac{S}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t/s}^0 e^{-\frac{1}{2}x^2} dx = As\sqrt{2\pi} \left\{ N\left(\frac{t}{s}\right) - \frac{1}{2} \right\}$$

ただし N(x) は標準正規分布関数である。よって新築建物の全建物ストックに対する比率は、

$$\frac{As\sqrt{2\pi} \left\{ N\left(\frac{t}{s}\right) - \frac{1}{2} \right\}}{As \frac{1}{2} \sqrt{2\pi}} = 2 \left\{ N\left(\frac{t}{s}\right) - \frac{1}{2} \right\}$$

となる。

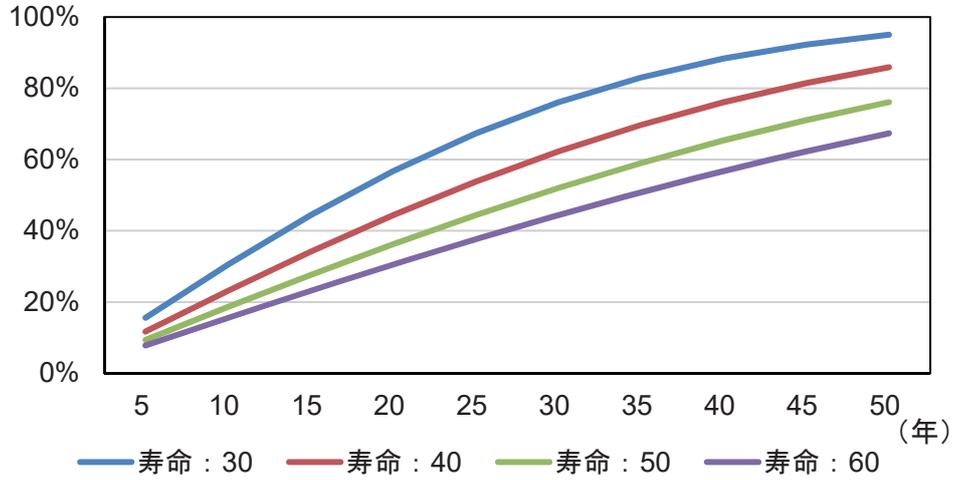
例えば、T=40 年とすると、10 年後では現時点以降の新築建物の割合は 23.1%、30 年後では 62% となる。T=60 では 10 年後では 15.6%、30 年後でも 44% である。人口が減少すると新築建物需要

^d 鎌谷直毅、小松幸夫 (2011) 「建築寿命に関する研究」2011 年度建築生産系建築生産演習報告、
<http://www.waseda.jp/sem-ykom/kamatani.pdf>

^e 鎌谷らは対数正規分布を用いているが、ここでは式の展開の容易さからワイブル分布を用いた。

も低下するので、上記は過大評価になると思われる。

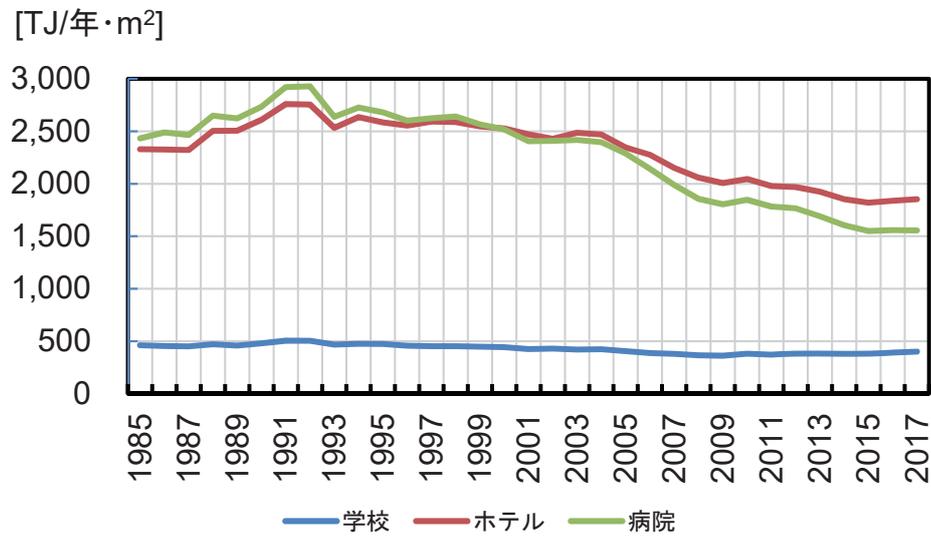
新築建物比率



年	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
寿命：30	15.6%	30.5%	44.4%	56.8%	67.3%	76.1%	83.0%	88.4%	92.3%	95.0%
寿命：40	11.7%	23.2%	34.1%	44.4%	53.8%	62.3%	69.7%	76.1%	81.5%	85.9%
寿命：50	9.4%	18.6%	27.6%	36.2%	44.4%	52.0%	59.0%	65.4%	71.1%	76.1%
寿命：60	7.8%	15.6%	23.2%	30.5%	37.6%	44.4%	50.8%	56.8%	62.3%	67.3%

付図1 ZEB 普及率試算

付録2 ZEB 参照データ



付図2 日本全体の病院、学校、ホテルのエネルギー消費原単位 [TJ/年・m²] 推移 (EDMC) [41]

付表1 ZEB リーディング・オーナーのうち『ZEB』について詳細データ（すべて事務所等）[38]

ZEBランク『ZEB』 建物用途：事務所等	延床面積： 2,173m ²	階数： 地上3階	茨城県	延床面積： 1,322m ²	階数： 地上2階	富山県	延床面積： 459m ²	階数： 地上2階	大分県
一次エネルギー消費量[MJ/年m ²]	基準値	設計値	設計値/ 基準値	基準値	設計値	設計値/ 基準値	基準値	設計値	設計値/ 基準値
年間熱負荷係数	450	254	0.57	450	234	0.52	470	216	0.46
空調	564	274	0.49	734	294	0.41	575.87	231.92	0.41
換気	37	26	0.71	34	16	0.48	189.7	20.69	0.11
照明	348	127	0.37	364	137	0.38	299.05	94.31	0.32
給湯	13	8	0.62	28	28	1	180.82	118.55	0.66
昇降機	18	16	0.89	0	0	-	0	0	-
創エネ	0	-481	-	0	-475	-	0	-934.21	-
その他	147	147	-	237	237	-	198.94	198.94	-
合計	1,127.00	117	0.11	1,397.00	237	0.17	1,444.38	-269.8	-0.19

ZEBランク『ZEB』 建物用途：事務所等	延床面積： 1,181m ²	階数： 地上3階	香川県	延床面積： 1,435m ²	階数： 地上2階	茨城県	延床面積： 644m ²	階数： 地上4階	北海道
一次エネルギー消費量[MJ/年m ²]	基準値	設計値	設計値/ 基準値	基準値	設計値	設計値/ 基準値	基準値	設計値	設計値/ 基準値
年間熱負荷係数	470	275	0.59	470	290	0.62	480	272	0.57
空調	550.25	313.14	0.57	822	431	0.53	710.27	339.05	0.48
換気	47.05	14.82	0.32	66	76	1.16	62.55	13.04	0.21
照明	278.81	61.07	0.22	328	81	0.25	340.65	111.61	0.33
給湯	3.89	7.48	1.93	14	11	0.79	7.12	9.02	1.27
昇降機	27.08	24.07	0.89	21	21	1	37.27	33.13	0.89
創エネ	0	-435.19	-	0	-805	-	0	-584.5	-
その他	125.47	125.47	-	0	0	-	186.95	186.95	-
合計	1,032.55	110.86	0.11	1,251.00	-185	-0.15	1,344.81	108.3	0.09

ZEBランク『ZEB』 建物用途：事務所等	延床面積： 1,279m ²	階数： 地上2階	静岡県	延床面積： 817m ²	階数： 地上1階	山口県	延床面積： 651m ²	階数： 地上3階	茨城県
一次エネルギー消費量[MJ/年m ²]	基準値	設計値	設計値/ 基準値	基準値	設計値	設計値/ 基準値	基準値	設計値	設計値/ 基準値
年間熱負荷係数	491	307	0.63	470	256	0.55	470	317	0.68
空調	1,202.00	361	0.31	1,006.47	426.17	0.43	821	464	0.57
換気	35	2	0.06	12.72	2.2	0.18	41	15	0.37
照明	498	163	0.33	429.04	104.91	0.25	332	70	0.22
給湯	111	72	0.65	0	0	-	48	32	0.67
昇降機	0	0	-	0	0	-	29	29	1
創エネ	0	-785	-	0	-625.22	-	0	-724	-
その他	347	347	-	507.52	507.52	-	173	173	-
合計	2,193.00	160	0.08	1,955.75	415.58	0.22	1,444.00	59	0.05

ZEBランク『ZEB』 建物用途：事務所等	延床面積： 600m ²	階数： 地上2階	静岡県	延床面積： 1,277m ²	階数： 地上3階	神奈川県	延床面積： 493m ²	階数： 地上3階	愛知県
一次エネルギー消費量[MJ/年m ²]	基準値	設計値	設計値/ 基準値	基準値	設計値	設計値/ 基準値	基準値	設計値	設計値/ 基準値
年間熱負荷係数	470	330	0.71	470	318	0.68	470	307	0.66
空調	775.53	213.3	0.28	715.38	433	0.61	782.57	285.88	0.37
換気	38.42	6.18	0.17	74.03	10.03	0.14	33.79	31.03	0.92
照明	342.38	82.62	0.25	388.66	119.87	0.31	387.2	149.99	0.39
給湯	85.98	171.95	2	4.14	8.18	1.98	3.08	7.93	2.58
昇降機	0	0	-	27.93	24.83	0.89	0	0	-
創エネ	0	-1,026.84	-	0	-756.49	-	0	-493.07	-
その他	166.21	166.21	-	171.93	171.93	-	237.28	237.28	-
合計	1,408.52	-386.58	-0.28	1,382.07	11.35	0.01	1,443.92	219.04	0.16

ZEBランク『ZEB』 建物用途：事務所等	延床面積： 131m ²	階数： 地上2階	沖縄県
一次エネルギー消費量[MJ/年m ²]	基準値	設計値	設計値/ 基準値
年間熱負荷係数	590	426	0.73
空調	822.48	214.47	0.27
換気	13.25	5.26	0.4
照明	381.31	160.4	0.43
給湯	7.05	5.08	0.73
昇降機	0	0	-
創エネ	0	-820.22	-
その他	292.67	292.97	-
合計	1,516.76	-142.04	-0.1

付録3 スマートシティの成果-4 地域実証事業報告書から得られた知見- [43,44]

付表2 横浜スマートシティプロジェクト成果

横浜スマートシティプロジェクト		面積：434.98 km ² 人口：3,688,773人 (2010年実値) 世帯数：1,583,889世帯		蓄電池		EV		PV		蓄電池		EV		ヒートポンプ他	
地域全体		▲29% (2005年度比)		CO ₂ 排出削減率		備考		容量 不明		容量 不明		容量 不明		容量 不明	
地域	連携	需要家	エネルギー消費削減率	CO ₂ 排出削減率	備考	PV	蓄電池	EV	ヒートポンプ他						
地域全体	【概要】住宅約4,000戸、大規模ビル約10棟を対象とした大規模な実証で、HEMSの社会実証、BEMSのDR実証、大型蓄電池SCADAを用いたVPPの実証、EVのDR実証を実施	需要家	システム利用電力平均▲14.5% PV自家消費率63.2% 節電要請時システム利用電力削減効果:夏▲16.5%冬▲11.8%	▲29% (2005年度比)	仮想電力料金の変化によるDR実証実験を実施	37 [MW]	HEMS 4,230[軒]	2,300[台]	ヒートポンプ他						
地域	連携	需要家	エネルギー消費削減率	CO ₂ 排出削減率	備考	PV	蓄電池	EV	ヒートポンプ他						
C	(オール電化不明)	(オール電化不明)	系統利用電力平均▲14.5%			容量 不明	容量 不明		ADRエアコン						
E	既築戸建て48戸	既築集合住宅	PV自家消費率63.2%			容量 不明	容量 不明		ADRエアコン						
M		・JXE社宅16戸	節電要請時システム利用電力削減効果:夏▲16.5%冬▲11.8%			容量 不明	容量 不明		ADRエアコン						
S		・パークホース大倉山177戸	ADRにより最大16.6%の節電効果			容量 不明	容量 不明		ADRエアコン						
M						容量 不明	容量 不明		ADRエアコン						
S						容量 不明	容量 不明		ADRエアコン						
C	(非オール電化)	(非オール電化)	DRによる電力削減平均21.3%	(PV売電分含む不明)		JXE社宅: 20kW	JXE社宅30kWh	容量 不明	JXE社宅: 燃料電池0.7kW x 6台、パ ーホース大倉山ヒートポンプ給湯器						
E	既築集合住宅	既築集合住宅	JXE所有住宅夏平均21.2% 冬平均20.2%の電力削減	共用部(H26実績H24比)		パークホース大倉山: 20kW	パークホース大倉山30kWh	容量 不明	太陽熱利用ガス温水システム SOLAMO屋上用10m ³ とバルコニー用3m ³ 、エネファーム 0.75kW/台が10台						
M	・東京ガス機子社宅24戸	・東京ガス機子社宅24戸	パークホース大倉山夏平均5.0% 冬平均8.2%の電力削減	JXE社宅平均26.5%削減		25kW	40kWh	容量 不明							
S	※2戸は見学用モデルルーム	※2戸は見学用モデルルーム		パークホース大倉山20.1%削減		容量 不明	容量 不明	容量 不明							
C	(オール電化不明)	(オール電化不明)	住棟全体の省エネ約30%	(PV売電分含む不明)		容量 不明	容量 不明	容量 不明							
E	大型商業施設	大型商業施設	HEMSによる追加的省エネ7%	住棟全体で約37%削減		容量 不明	容量 不明	容量 不明							
M	・イトーヨーカドー横浜別所店	・イトーヨーカドー横浜別所店		住棟全体で約37%削減		容量 不明	容量 不明	容量 不明							
S			シミュレーションの結果2005年度比で38.6%削減可	シミュレーションの結果2005年度比で43.3%削減可		容量 不明	容量 不明	容量 不明							
C	EV/カーシェア	EV/カーシェア	シミュレーションの結果2005年度比で38.6%削減可	シミュレーションの結果2005年度比で43.3%削減可		容量 不明	容量 不明	容量 不明							
E	・V2H、集合住宅V2H、EVシェアリング	・V2H、集合住宅V2H、EVシェアリング				容量 不明	容量 不明	容量 不明	容量 不明						
M			(PV売電分なし)	(PV売電分なし)		容量 不明	容量 不明	容量 不明	容量 不明						
S			一般住宅V2H実証のPV自家消費率25%増にもないCO ₂ 排出量25%減	一般住宅V2H実証のPV自家消費率25%増にもないCO ₂ 排出量25%減		容量 不明	容量 不明	容量 不明	容量 不明						

付表3 愛知県豊田市における『家庭・コミュニティ型』低炭素都市構築実証プロジェクト成果 [43,44]

愛知県豊田市における『家庭・コミュニティ型』 低炭素都市構築実証プロジェクト		面積：918 km ² 人口：422,865人 (2010年実績) 世帯数：164,040 世帯	自動車保有台数：366,065 台				
地域全体	エネルギー情報マネジメントシステム (EDMS) の研究開発：社会コストを抑えながら需要サイド、地域全体でのグリーンエネルギーの最大の有効活用を図る ・豊田市における木質ペレットの地産地消スキーム構築	CO ₂ 排出削減率 ▲ 30.1% (2005年と比較した2020年試算結果)	CO ₂ 排出削減量 ▲264,740t-CO ₂ (2005年と比較したCO ₂ 削減量の2020年試算結果)	PV 6293 [kW]	蓄電池 家庭用燃料電池 273台 家庭用Li蓄電池 81台	EV EV	ヒートポンプ他
地域	エネルギー消費削減率 エネネ：▲28.8%	CO ₂ 排出削減率 ▲ 20.8% (EDMS世帯と未導入棟を比較) (内訳：省エネ45.1% グリーン電力2.8% 地域融通52.2%)	備考 EDMSは、「データ収集」「予測」「需給調整」「行動誘発」「モニタリング」の一連のプロセスで需要側のエネルギーマネジメントを行う。複数のメモリーカードやシステムが接続できるマルチベンダ性を確保	PV 容量不明	蓄電池 容量不明	EV EV	ヒートポンプ他
豊田市	工業団地内から発生する排熱を回収・蓄熱し、別工場に既存物流ラインを用い輸送し、蒸気や温水等の熱源、排熱を利用した熱電変換に利用。世界初の化学蓄熱を用い経済性を大きく改善できる計画を策定した	省エネ：▲11% 年間8,599GJ/年の省エネ効果が期待できるところを検証した	工業団地の電力需要や自家発電運用を把握し、地域内でのピークカットや熱電変換も活用したデマンドレスポンス等、効果の技術実証を計画した。			超小型EV100台 充電器200台 ステーション20箇所	蓄熱輸送マネジメントシステムを構築 (蓄熱に水酸化カルシウムまたは水酸化マグネシウム)
カシノ	ワンマイルモビリティ「OMMS」 (EVシェア：会員3,000名以上)	ワンマイルモビリティ利用に伴うCO ₂ 削減効果 ▲108.7 kg-CO ₂ /年・人					
用途別	FCバス3台 (水素燃料) V2H			太陽光充電設備33基設置		最大9.8kW給電、175.5kWhの連続給電量、他社と互換性のある電力受電盤、HVバス4台購入、FCHVバス1台導入、水素ステーション設置	

低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書
 建物と輸送エネルギーシステムのスマート統合がもたらす地域
 民生部門炭素排出削減の定量評価
 令和2年3月

付表3 愛知県豊田市における『家庭・コミュニティ型』低炭素都市構築実証プロジェクト成果 [43,44] (続き)

カテゴリー	サブモジュール	算出結果(排出量・削減量(t-CO ₂)/削減率(%))				
		排出量 ('05年)	排出量 ('20年)	削減量 ('05年→'20 年)	部門にお ける 削減率	全体に対 する 削減率
①家庭内でのエネルギー有効利用	スマートハウス・再生可能エネルギーの普及					
	DRポイント・RTP					
②コミュニティのエネルギー有効活用	リモート・生活支援エージェント	460,000	377,790	▲ 82,210	▲ 18	▲ 9
	目標チャレンジ					
	地域融通					
③低炭素交通システムの構築	余剰電力の活用 (学校との融通)			▲ 51,530	▲ 12	▲ 6
	1)次世代自動車の導入促進			-	-	-
	2)充電インフラ・水素ステーションの設置・拡充	419,000	236,470	0	0	0
	3)ITSを活用した交通流整序とエコドライブ促進			▲ 131,000	▲ 31	▲ 15
	4)公共交通機関利用促進					
	5)パーソナルモビリティの共同利用					
合計		879,000	614,260	▲ 264,740		

付表4 けいはんなエコシティ次世代エネルギー・社会システム実証プロジェクト成果 [43,44]

けいはんな次世代エネルギー・社会システム実証プロジェクト		（参考）面積：15,410 ha 人口：1,200,966人（2016年4月1日）			
【概要】生活の質や利便性を損なうことなく効率的な利用を図るエネルギーマネジメントの構築を目指す。住宅約700戸等を対象としたDR実証を実施。電力会社による家庭向け省エネコンサル実施。		▲35%（2007年比）		(2020年度の目標値) 夏の屋下がり（13時-16時）ピークカット・シフト▲39%（2007年比） 冬の夕方（18時-21時）ピークカット・シフト▲45%（2007年比）	
地域全体		エネルギー消費削減率		CO ₂ 排出削減率	
需要家		エネルギー消費削減率		CO ₂ 排出削減率	
連携		エネルギー消費削減率		CO ₂ 排出削減率	
地域		エネルギー消費削減率		CO ₂ 排出削減率	
C	新築戸建 14軒	(PV売電分なしで) ▲64[%] 2007年度781[kg-CO ₂ /人・年] →2014年度実績208.2[kg-CO ₂ /人・年]	(PV売電分なしで) ▲58[%] 2007年度1,210[kg-CO ₂ /人・年] →2014年度実績503.3[kg-CO ₂ /人・年]	(2020年度の目標値) 夏の屋下がり（13時-16時）ピークカット・シフト▲39%（2007年比） 冬の夕方（18時-21時）ピークカット・シフト▲45%（2007年比）	備考 (住宅の立地) 京都府京田辺市同志社山手地区
E	けいはんなプラザ	(PV売電分不明) ▲32[%] 2007年度1091kg-CO ₂ /人・年 →2014年度実績731[kg-CO ₂ /人・年]	(PV売電分不明) ▲32[%] 2007年度1091kg-CO ₂ /人・年 →2014年度実績731[kg-CO ₂ /人・年]	ビル設備（蓄電池等）は直接制御の一方、給湯、空調、照明、PC等は見える化によるユーザ（ホテル宿泊者、テナント）の省エネ行動にゆだねられている。	
M	EV/カーシェア	(PV売電分不明) ▲32[%] 2007年度1,442kg-CO ₂ /人・年 →2014年度実績1,213[kg-CO ₂ /人・年]	(PV売電分不明) ▲32[%] 2007年度1,442kg-CO ₂ /人・年 →2014年度実績1,213[kg-CO ₂ /人・年]	EVユーザは、けいはんな地区（京田辺市、木津川市、精華町）に在住の個人もしくは法人で、eメールにより充電タイムリングの変更、抑制の要請が行われた。	
S					
蓄電池		容量不明	容量不明	容量不明	EV 102台
PV		容量不明	容量不明	容量不明	
ヒートポンプ他		エコキュート7台、SOCF2台、エネファーム2台、エコジョーズ2台、SOLAMO1台	エコキュート7台、SOCF2台、エネファーム2台、エコジョーズ2台、SOLAMO1台	水蓄熱槽、ガス冷温水器、その他熱源	

付表 5 北九州コミュニティ創造事業 [43,44]

北九州スマートコミュニティ創造事業		面積：1.2km ² 人口：600人（2010年実数） 1,800人（2014年推計値）		PV	蓄電池	EV	ヒートポンプ他
地域全体	[概要]新日鐵住金の特定供給エリアで実証。コージェネをベースロード電源と見立て、需要家180戸において、需給状況に応じて電力料金を変動させるダイナミックペライシングの実証を実施	(PV発電等含む) 電力消費削減率▲40.5% (2014年度東田地区単位面積値、2005年一般街区単位面積値比)	▲51.5% (2014年度東田地区単位面積値、2005年一般街区単位面積値比)	819[kW] (メガソーラー5[MW])	565kW		東田コージェネ 33,000kW、風力 6kW、水素（電力） 113kW、定置式燃料 電池500kW、太陽熱 153kW相当
連携	需要家	エネルギー消費削減率	CO ₂ 排出削減率	PV	蓄電池	EV	ヒートポンプ他
C E M S	HEMS②リビオ東田、門司地区	(電力消費削減率) TEMS(Town EMS)の運用で、住戸毎のエネルギーマネージメントに比較して▲10%	・タウン共用蓄電池を使用した電力融通による運用で太陽光発電を面的に利用 ・蓄電池と家電を制御 ・家電機器ごとの電力、温湿度、照度、在/不在室情報を見える化、および節電提案 ・年間約18,300円の電気代削減効果	容量 不明	住宅団地：3kW/戸、 L蓄電池(100kWh)を 7件の住宅で共有、 CEMS連携した自動制御 を実施。	EV	ヒートポンプ他 ADRエアコン、ADR コンセント
C E M S	HEMS③水素実証住宅	(電力消費削減率) ・H25年度のCEMS連携実証から、蓄電池容量が十分な場合に1日平均▲14.8%省エネ率を確認 このデータを元に一般家庭を想定して算出した年間平均省エネ率は▲13.1%		容量 不明	容量不明		直流家電
C E M S	BEMS④オフィスビル	需要家の機器（照明・空調）を人の動向に応じた省エネ制御をすることで▲約10%			50kW	EV模擬蓄電池40kW	
C E M S	BEMS⑤小規模店舗スマートストア (ファミリーマート等)	▲7.2% (店舗機器・省エネ制御・PV発電効果)		容量 不明	容量 不明		
C E M S	BEMS⑥大規模公共施設 (いのちのたて博物館)	▲15%	▲15%				ADRエアコン、ADR 照明
C E M S	BEMS⑦大規模病院 (脱鉄記念八幡病院)	▲3.7%					

付表5 北九州コミュニティ創造成業 [43,44] (続き)

地域	連携	需要家	エネルギー消費削減率	CO ₂ 排出削減率	備考	PV	蓄電池	EV	ヒートポンプ他
北九州 市東田地区	C E M S	BEMS®大規模商業施設 (イオンモール八幡東)	専門店電力削減 平均▲2.9% 家庭100世帯の消費電力削減 平均▲17.2% (▲9.9kW)		商業施設における地域と連携したエネルギーマネジメントシステムの有効性検証 ・DP 発令時間帯にイオン八幡東店に来店した場合に100W/AON ポイントを付与				
	C E M S	FEMS®クリーニング工場 (ワタキョーセイモア工場)	▲1.3%		ダイナミックブライディングを考慮した製造スケジューリングの表示。クリーニング工場においてダイナミックブライディングに基づきラインの稼働を制御				
	C E M S	用途別：交通システム① (EVステーション) IX日飯日石エネルギー	(電力消費削減率) ・DR、IP (インセンティブプログラム) による再生可能エネルギー発電時間への誘導により、再生化のエネルギー使用率1.5%改善 ・エコドライブ支援による電費改善10%	エコドライブ・ダイナミックブライディング・蓄電池の効果と地域の再生エネルギーの導入効果により▲35%削減	CEMSとの連携により地域コミュニティの電力供給調整を行える「EV用充電・蓄電システム」とドライバーの充電行動を誘導し、環境負荷意識を喚起するための「エコドライブ見える化システム」を統合した「エコドライブ総合支援システム」を開発			容量不明	

参考文献

1 章

- [1] SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5°C “Summary for policymakers”.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf (アクセス日 2019年12月19日)
- [2] LED IIASA.
https://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitionstoNewTechnologies/Low_Energy_Demand.html (アクセス日 2019年12月19日)
- [3] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, “低炭素電源システムの安定化と技術・経済性評価 (Vol.3) –2050年の低炭素電源システムの技術開発課題–”, 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 平成31年3月.
- [4] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 社会システム編, “民生家庭部門の省エネルギー促進からの 低炭素社会実現 (Vol.3)”, 独立行政法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター, 平成29年3月.
- [5] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術普及編, “家庭・中小業務における「電気代そのまま払い」社会実装のための提案書”, 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 平成29年3月.
- [6] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, “民生家庭部門におけ CO₂ 排出量の中長期予測モデル構築に向けた検討”, 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 平成30年3月.
- [7] 環境省, “家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査 (家庭 CO₂ 統計) ”.
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kateiCO2tokei.html> (アクセス日 2019年12月19日)
- [8] (一社) 環境共創イニシアチブ, “エネルギー管理システム導入促進事業 (BEMS) 専用サイト”. <https://www.ems-opendata.jp/> (アクセス日 2019年12月19日)
- [9] Web アンケート調査, 東京理科大学 Green&Safety 研究センター (S1001018, 2011-2015 および科研費基盤研究(C) (22560407, 2011-2013) による

2 章

- [10] 経済産業省, “長期エネルギー需給見通し”, 2015.
http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf (アクセス日 2019年12月19日)
- [11] 環境省, “長期大幅削減に向けた基本的考え方”, 2018.
https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/post_38.html (アクセス日 2019年12月19日)
- [12] 国立環境研究所・京都大学立命館大学・みずほ情報総研, 環境省地球環境研究総合推進費戦略研究開発プロジェクト, “2050 日本低炭素社会シナリオ: 温室効果ガス 70%削減可能性検討”, 2008. <http://2050.nies.go.jp/LCS/jpn/list.html> (アクセス日 2019年12月19日)
- [13] 小宮山宏, 山田興一, “新ビジョン 2050”, 日経 BP 社, 2016.
- [14] Gruebler, A et.al., “A Low Energy Demand Scenario for Meeting the 1.5°C Target and Sustainable Development Goals without Negative Emissions”, Nature Energy 3, 515-527, 2018.

- [15] 産業構造審議会 産業技術環境分科会研究開発・イノベーション小委員会, “パラダイムシフトを見据えたイノベーションメカニズムへー多様化と融合への挑戦(中間とりまとめ)”, 2019年6月.
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/kenkyu_innovation/pdf/report2019_06_01.pdf (アクセス日 2019年12月19日)
- [16] 柏木隆夫, “超スマートエネルギー社会 5.0”, エネルギーフォーラム社, 2018.
- [17] 国立社会保障・人口問題研究所, “市町村別に見た推計結果(平成30年(2018年)推計)”.
http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson18/2gaiyo_hyo/gaiyo.asp (アクセス日 2019年12月19日)
- [18] 総務省、第29次地方制度調査会第23回専門小委員会資料.
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/singi/chihou_seido/singi/12640_2.html (アクセス日 2019年12月19日)
- [19] 長岡市アクアボニックス. <https://www.jacom.or.jp/saibai/news/2019/09/190913-39106.php> (アクセス日 2019年12月19日)
- [20] 地球温暖化対策推進本部, “2017年度における地球温暖化対策計画の進捗状況”. 平成31年3月29日 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai39/siryu.pdf> (アクセス日 2020年3月12日)
- [21] 国土交通省, 露木 伸宏, “MaaS について”. https://www.mlit.go.jp/pri/kikanshi/pdf/2018/69_1.pdf (アクセス日 2019年12月19日)

3 章

- [22] 資源エネルギー庁, “ZEHの定義(改定版)”.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/assets/pdf/general/housing/zeh_definition_shugou.pdf (アクセス日 2020年3月2日)
- [23] 環境省, “平成29年度 家庭部門のCO₂排出実態統計調査”.
<https://www.env.go.jp/press/106004.html> (アクセス日 2019年12月19日)
- [24] 国立社会保障・人口問題研究所, “日本の世帯数の将来推計(都道府県別推計)(2019年推計)”.
<http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Mainmenu.asp> (アクセス日 2019年12月19日)
- [25] (株)住環境計画研究所, “家庭用エネルギー統計年報2017年版(CD-R)”.
- [26] Panasonic Technical Journal Vol.58, No.2, Jul.2012.
<https://www.panasonic.com/jp/corporate/technology-design/ptj/pdf/v5802/p0104.pdf> (アクセス日 2019年12月19日)
- [27] 三菱重工技報, Vol.48, No.4, 2011. <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/484/484086.pdf> (アクセス日 2019年12月19日)
- [28] 総務省, “平成30年住宅・土地統計調査”. <https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2018/tyousake.html> (アクセス日 2019年12月19日)

4 章

- [29] 井本, “バッテリー式電気自動車の電費性能について”, JARI Research Journal, 20190402.
http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/JRJ_q/JRJ20190402_q.pdf (アクセス日 2019年12月19日)
- [30] 経済産業省, “総合エネルギー統計(2016)”.
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2 (アクセス日 2019年12月19日)
- [31] 環境省, “温室効果ガス算定表(2019)”. <https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran2019.pdf> (アクセス日 2019年12月19日)
- [32] 自動車検査協会, “都道府県別・車種別保有台数表”,
<https://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html> (アクセス日 2019年12月19日)

- [33] 伊藤, 森本, 森, "GISによる地域エネルギー需要推計及びCGS、HP、PV導入評価", 第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、21-1、虎ノ門パストラル(東京)、2006年1月
- [34] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, "新しいエネルギー変換・貯蔵機器技術、未利用熱源およびビル省エネルギー技術の導入と技術特性を明示した都市分散エネルギーシステムの在り方に関する研究", 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 平成30年1月.
- [35] 野原, 伊香賀他, 東京都における業務用ビルの省エネルギー対策とその削減効果(その2) 業務用ビルのエネルギー消費量と省エネルギー対策の効果検討, 第17回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演輪文集、13-2、虎ノ門パストラル(東京)、2001年1月

5 章

- [36] 経済産業省資源エネルギー庁「ZEBロードマップ検討委員会とりまとめ」(平成27年12月)
<https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/zeb/03.pdf> (アクセス日 2019年12月19日)
- [37] 経済産業省資源エネルギー庁, 「ZEBロードマップフォローアップ委員会とりまとめ」(平成31年3月)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/support/pdf/1903_followup_summary.pdf (アクセス日 2019年12月19日)
- [38] Sii一般社団法人 環境共創イニシアチブ, 平成31年度 ネット・ゼロ・エネルギー・ビル(ZEB)実証事業 <https://sii.or.jp/> (アクセス日 2019年12月19日)
- [39] エネマネオープンデータ(BEMS)公開サイト. <https://www.ems-opendata.jp/> (アクセス日 2019年10月28日)
- [40] 日本不動産研究所, "全国オフィスビル調査(2019年1月現在)", 2019.
<http://www.reinet.or.jp/wp-content/uploads/2019/09/d560b060c757f43c38640531f432424b.pdf>
(2019年12月19日アクセス)
- [41] 一般財団法人 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編, 一般社団法人省エネルギーセンター発行, 日本エネルギー・経済統計要覧EDMC(2019)
- [42] 国交省, 平成30年建築物ストック統計, "法人等の非住宅建築物延べ床面積".
http://www.mlit.go.jp/report/press/joho04_hh_000785.html (アクセス日 2019年12月19日)

6 章

- [43] 経済産業省, 次世代エネルギー・社会システム協議会資料等.
<https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633> (アクセス日 2019年12月19日)
- [44] 一般社団法人新エネルギー導入促進協議会. <http://www.nepc.or.jp/> (アクセス日 2019年12月19日)

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

建物と輸送エネルギーシステムのスマート統合が もたらす地域民生部門炭素排出削減の定量評価

令和2年3月

An Empirical Study of Regional Carbon Emission Reduction Potentials by a Smart Integration of Buildings and Mobility Energy Systems

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2020.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 研究員 桐山 恵理子 (KIRIYAMA Eriko)
研究員 篠原 百合恵 (SHINOHARA Yurie) (令和2年1月31日まで)
研究統括／上席研究員 森 俊介 (MORI Shunsuke)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2020 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
