

# 都市における住宅用太陽光発電システム 普及分析の動向と展望

小杉 隆信

## Trends and Perspectives in the Analysis of Residential Photovoltaic Deployment for Urban Areas

Takanobu KOSUGI

Abstract

With the emergence of distributed energy technologies, energy supply issues can now be dealt with on a local or urban-policy scale, rather than the national or regional scale of centralized energy supply structures. Among those distributed technologies, solar photovoltaic systems are an emission-free, renewable power generation source that can be placed on residential rooftops. They thus have large diffusion potential in urban areas with many dwellings, and will play a key role in the realization of low-carbon smart cities. This paper first outlines the significance and shortcomings of facilitating residential photovoltaic deployment in the context of energy and urban policies. Next, it derives some social attributes and neighbor effects, crucial factors associated with such deployment, from the results of existing studies, and conducts an original cross-sectional analysis for populous Japanese cities. Based on these, the paper discusses how the analysis of residential photovoltaic deployment relates to those of various urban policy issues, and potentially expands into interdisciplinary studies and public participation practices. Finally it presents some challenges that must be overcome to promote such expansion.

### 1. はじめに

太陽光発電システムは、その技術的進展および量産効果による費用の低下傾向と、エネルギー源を化石燃料から再生可能エネルギーに転換し二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出削減を促そうとす

る政策的措置とに促されて、導入が急速に進んでいる。日本における設置量は2010年度には3.9GW（1GW=100万キロワット）であったものが、再生可能エネルギーの固定価格買取制度の導入（2011年決定、2012年実施）の後押しもあって2016年度末には住宅用9.4GW、非住宅用29.7GWの計39.1GWにまで増加し、総発電量に占める太陽光発電の割合は4.8%に達したとみられる（資源エネルギー庁、2017）<sup>1</sup>。

今後については、長期エネルギー需給見通しによれば、2030年度における温室効果ガス排出削減目標（2013年度比26%減）に整合する太陽光発電の普及の目標として64GW、総発電量に占める割合として7.0%程度が掲げられている（経済産業省、2015）。一方で、2015年に採択された持続可能な開発目標およびパリ協定に盛り込まれた長期的な気候変動緩和目標を達成するシナリオとして、国際エネルギー機関（IEA）は、日本における総発電量に占める太陽光発電の割合を2030年には11%、2040年には15%にまで高めるべきとする内容を提示している（IEA、2017）。後者のとき、2040年の太陽光発電の設置容量は128GWとなり、全発電設備容量の34%を占めることになる。

太陽光発電システムは地上だけでなく住宅等建築物の屋根や壁面に設置できることから、電力需要家が住む都市部の建築物に設置することにより送配電ロスを抑えられる利点があり、住宅への導入を着実に増やしていくことが期待される。しかし一方で、こうした導入は都市の様相を変えることにもつながり、さまざまなメリットが享受できるだけでなく、いくつかの課題も顕在化する可能性がある。

そこで本稿では、都市における住宅用太陽光発電システムの将来の普及に関わる諸課題を議論する。まず、エネルギーおよび都市政策の文脈からの住宅用太陽光発電システムの普及の意義と課題について文献資料に基づいて整理する。次に、それらのシステムの既往の普及分析事例と、筆者による大都市部を対象とした普及要因分析を通じて、普及に関わって考慮すべき要因としての重要な社会的都市属性と近隣効果を抽出する。最後に、これらの情報に基づく考察を通して、今後の住宅用太陽光発電システムの普及拡大が如何に都市に関わる多様な政策課題と関わり、学際的研究や市民参加を必要とするかについて議論するとともに、それらを推進する一助としての情報提供のあり方について若干の提示を行う。

## 2. 都市における住宅用太陽光発電システム普及の意義と課題

### 2.1. 世界のCO<sub>2</sub>排出抑制における都市での取組みの重要性

世界のエネルギー消費とそれに起因するCO<sub>2</sub>排出の約4分の3は都市部で生じていると推計されている<sup>2</sup>。今後のさらなる都市化の進展も予想されており（United Nations、2014）、世界全体でのCO<sub>2</sub>排出量の削減という課題において都市の重要性は高まりつつある。

近年、再生可能エネルギー導入などのCO<sub>2</sub>排出抑制策を国ではなくて都市レベルで主導しようとする動きとして、国際環境自治体協議会（イクレイ）が支援する100%再生可能エネルギーを目指す都市・地域ネットワークや、気候変動対策に積極的に取り組むC40と呼ばれる

大都市グループによる活動がみられる。これらに参画している都市は、エネルギー源に占める再生可能エネルギー比率の向上やCO<sub>2</sub>排出量の削減に関する高い目標を設定してその達成に努めており、例えば、上記の両方に参画している米国サンフランシスコ市は、2020年までに電力消費量の100%を再生可能エネルギーで賄うことを目指した政策を打ち出している（安達、2016）。C40に参加する都市の人口の合計は世界全体の16%を占める一方、エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量は世界全体の20%を占めるという<sup>3</sup>。

日本においても、2015年度において、1,400以上の地方自治体の中で東京都の特別区と20の政令指定都市における人口だけで日本全体の29%を占めると推計される（総務省統計局、2016）ことから分かるように、世界あるいは国スケールでのエネルギー消費とCO<sub>2</sub>排出の削減を進める上で、数は少なくとも全体に与える影響の大きい大都市において取組みを推進することには大きな意義がある。

太陽光発電システムはとりわけ、このような都市部におけるCO<sub>2</sub>排出削減の方策として期待される。都市には住宅等の建築物が多く存在し、設置場所の確保の点で有利となる。日本においては特に、国内の太陽光発電の潜在的な導入可能量（ポテンシャル）の過半数が住宅系建築物への設置分であるとの見積りもある（環境省地球環境局地球温暖化対策課、2013；2014）。さらに、住宅への設置には、価格競争上の優位性も存在する。すなわち、住宅用の比較的小規模な太陽光発電システムは地上設置型の大規模システムと比べて出力当たりの設置費用は高くなるが、発電量当たりの費用は住宅用であれば電力の小売価格との競争となり、それより低い卸売価格との競争となる大規模システムと比べると有利となる。

## 2.2. 住宅用太陽光発電普及の意義と課題

住宅用太陽光発電の普及は上述のようにCO<sub>2</sub>排出削減への貢献が期待されるが、そのほかにも多様な意義がある。一方で、いくつかの課題も指摘されている。文献調査に基づき、これらの意義と課題を環境・エネルギー技術的側面、社会経済的側面および住民の心理的側面に分けて示してみよう。

### 2.2.1. 環境・エネルギー技術的側面

太陽光発電システムは製造段階や使用後処理段階ではエネルギーを投入しCO<sub>2</sub>を排出するものの、運用時には化石燃料を消費せずに発電を行うため、ライフサイクル全体で見れば、化石燃料消費とCO<sub>2</sub>排出の削減に貢献することが知られている（河本、2011）。さらに、建築物の屋根に設置することにより断熱効果が得られる可能性があるほか、都市部に大量に設置することによってヒートアイランド現象が緩和されるとの推計もある（Ma et al., 2017）。夏季の気温が低下すれば冷房需要が節約されることで省エネルギーにつながり、CO<sub>2</sub>排出量の削減効果がさらに高まることになる。

一方、大規模な普及には懸念材料もある。代表的なものとして、系統連系上の課題が挙げられる（小林、2017）。すなわち、逆潮流が生じることによって配電システムの電圧管理が難しくな

る上に、太陽光発電の出力が不安定な中で電力需給バランスを損なわないために、太陽光発電による出力の変動に即時的に対応して需要を満たすためのバックアップ電源や蓄電池が必要となる。この問題に対しては、将来のスマートハウスやスマートコミュニティ化による電力需要の抑制（デマンドリスポンス）や、蓄電池を搭載している電気自動車と住宅あるいは系統への連系（いわゆる V2H や V2G）という対策が期待されており、実証も行われつつあるが（池田・大岡、2014；能登路・中川、2016）、各都市でこれらの導入が順調に進むかどうかは未知数である。また、ヒートアイランドが緩和されることで夏季に得られるメリットとは表裏の関係にある課題として、冬季に暖房需要が増加する可能性がある。

## 2.2.2. 社会経済的側面

太陽光発電は自立分散型電源であり、災害等によって大規模集中型電源が停止したり送電線の不具合が生じたりして停電に陥った場合にも、（同じ災害によって太陽光発電自体は被害を受けていないことと、停電時に動作するように予め設計されていることを前提条件として）発電を続けることができることから、その普及は、災害に対する都市のレジリエンスを高めることにつながる（馬場・田中、2015）。

さらに、太陽光発電システムの普及が進むことで、その都市での経済的な効果も期待される。すなわち、建築物へのシステムの設置作業は地元の業者が請け負うことが多いため、それによる雇用の創出等が見込まれるのに加えて、設置後には太陽光発電の電力を使えるので電力購入費用を抑えられるのみならず、売電によって利益が得られる。この利益の一部が地元での消費支出に回されることにより、経済効果を生じさせることになる（安田、2016）。また、電力購入を抑えられることによって、電気料金が高騰した場合の不利益も緩和できることになる。このことはとりわけ、所得に占める電気代の負担割合が比較的大きい低所得者層にとってメリットとなりうる。

一方、課題としては設置時に生じる費用負担がある。太陽光発電システムの価格は 2015 年度には出力 1kW あたり 37 万円程度まで低下してきたものの（経済産業省、2017）、典型的な出力規模である 4kW の住宅用システムの導入には初期費用が 150 万円近くかかることになる。たとえ長期的には上記の経済的メリットを得られると見込まれるとしても、特に低所得者にとって初期費用の負担は大きい。このことに加えて、設置したシステムからの発電電力の買取費用の一部は固定価格買取制度に基づき電気料金に賦課金として上乗せされることを踏まえると、初期費用を支出できる高所得者層とそうではない低所得者層との格差の拡大につながりかねない。

また、太陽光発電システムの普及が増加するにつれて故障も発生し、それに伴う火災などの事故も生じる（大関・吉富、2013）。これについては、近隣の出力状況を参考にして異常を検知するなどによって故障を早めに発見する技術等が研究されているが（近藤・亀田、2017）、システムどうしの情報通信が行われることが前提となる。さらに、長期的には、老朽化したシステムの廃棄についての問題も生じるだろう（田形・志々目、2017）。

### 2.2.3. 住民の心理的（意識・行動）側面

住宅への太陽光発電システムの設置は、住民の意識や行動に影響を及ぼしうる。例えば、本藤・馬場（2008）は、設置世帯において日常生活における省エネルギーなどの環境配慮行動が促進されるとの調査結果を示している。一方、Caird et al.(2008) による英国でのアンケート調査によれば、設置者の多くはやはり省エネルギーをさらに心掛けるようになったと回答したものの、設置したシステムが発電している時にその電力を使いがちになると回答した設置者もいたと報告されている。導入の初期段階では環境配慮意識の高い設置者が多くても、普及が進むにつれてそうではない設置者も増えることが予想され、それによりいわゆるリバウンド効果が生じる可能性があることには留意すべきであろう。

さらに近年、設置者の周囲の人々の意識と行動にも影響を与える可能性があることが指摘されている。すなわち、設置者の近隣の住民が、設置済みの太陽光パネルを観たり設置住民とコミュニケーションを行ったりすることによって、受動的あるいは能動的に自宅への設置意向を強めるとの報告があり（Rai and Robinson, 2013）、このような影響は近隣効果（neighbor effect または peer effect）と呼ばれる。

各都市において、太陽光発電システムの今後の導入により上に挙げたようなさまざまなメリットを享受するとともに直面しうる課題にうまく対処するためには、時系列的・空間的な両面からシステム普及量の推移を予測することが期待される。さらには局地的に普及を促進したり逆に過剰な普及を抑えたりするための政策的介入が望まれる場合も生じるだろう。そのためには、普及の要因を詳しく知る必要がある。

## 3. システムの普及要因の分析

### 3.1. 普及に関わる都市属性：既往分析事例からの示唆

都市における住宅用太陽光発電の普及率を説明する要因として、Li et al.(2012) は、日照量といった自然的属性、人口の年齢構成や密度といった社会的属性、所得水準や設置価格、設置補助金といった経済的属性を挙げ、いくつかの都市における導入実績に基づく統計分析を行うことでそれぞれの要因の影響度を推計している。日本を対象とした類似の分析例として、上記の要因のほかに住宅の新設投資や住民の環境意識（こどもエコクラブ加入状況）に着目した Zhang et al.(2011)、日照量と住宅の広さに着目した吉田（2012）、投資回収期間に着目した遠藤（2012）、固定価格買取制度に基づく買取価格の影響に着目した白石・Kammen（2017）などがある。また、アンケートから得たデータを用いた普及要因の分析として、所得のほか電化製品の所有状況や省エネルギー・省資源への志向に着目した福代（2011）、環境用語の知識に着目した岩田ら（2012）などがある。なお、住民の環境意識については、海外においては、気候変動等の環境問題に力を入れている政党（米国であれば民主党、ドイツであれば緑の党）への投票率という公的な情報を分析に用いた例がある（Kwan, 2012；Schaffer and Brun, 2015）。

これらの分析からは、総じて、日照量が大きく、人口に占める高齢者の割合が低く、世帯人員が多く、人口密度が低く、住宅が大きく、所得水準が高く、設置価格が低く、設置補助金や固定価格買取という経済的支援が充実し、住宅の新築が活発に行われ、住民の環境意識が高い、といった属性的条件が、住宅用太陽光発電の普及と正の相関を有することが示されている。

上記の属性のうち、新築の多さが普及率に影響することは、公的統計からも確認できる。平成 25 年（2013 年）住宅・土地統計調査結果には住宅建築時期別の設置数の推計値が示されているが、それによれば、日本全国において 2005 年以前に建築された住宅（集合住宅を含む）での設置率は 2.3% であるのに対して、2006 年～2010 年築住宅での設置率は 6.3%、2011 年 1 月～2013 年 9 月築住宅では 14.2% と、最近 10 年間のうちに新築住宅での設置率が大幅に増加していることが分かる（総務省統計局、2015）。また、住宅市場動向調査結果によれば、新築住宅の中でも、いわゆる注文住宅（分譲ではなく持家）での太陽光発電の整備率が特に高い<sup>4</sup>。これらのことから、太陽光発電システムの設置先が既築住宅か新築住宅かによって普及の要因は相当に異なることが想像される。

そこで以下では、既往研究では不十分であった、建築時期別での住宅用太陽光発電システムの普及要因の解明を試みる。また、普及要因として、従来あまり着目されてこなかった国政選挙における投票結果や新築時における注文住宅の割合を考慮に入れることにする。

### 3. 2. 東京都区部と政令指定都市における追加的分析

既築住宅と新築住宅とを区別した住宅用太陽光発電システム普及要因分析を、日本の大都市、具体的には東京都区部と政令指定都市を対象として取り上げて実施する。本稿執筆時点での政令指定都市数は 20 であるが、ここで分析対象とする政令指定都市は、2008 年時点における 17 市<sup>5</sup>である。これらの都市に属する行政区と東京都特別区の合計 186 区における、既築住宅での近年の設置率の増分と新築住宅での設置率のそれぞれを被説明変数として、関連が深いと思われる各種属性変数を説明変数とする重回帰分析を行う。

ここで、既築住宅は 2005 年 12 月以前に建築された住宅（2005 年 12 月以前築住宅）を指すこととし、近年の既築住宅での設置率の増分は、平成 25 年住宅・土地統計調査結果（総務省統計局、2015）から得られる 2005 年 12 月以前築住宅での設置率から、平成 20 年（2008 年）の同調査結果（総務省統計局、2010）から得られる 2005 年 12 月以前築住宅での設置率を差し引いたものとする。一方、新築住宅は 2011 年 1 月～2013 年 9 月築住宅とし、その設置率は、平成 25 年住宅・土地統計調査から得られた値とする。なお、これは正確には、建築時に既に設置済みであるものに加えて、建築から約 2 年半以内に設置した場合も含んだ設置率である。

図 1 には、分析対象とした各都市における設置率を示す。2011 年以降の新築住宅における設置率が既築住宅と比べて明らかに高いことなどが分かる。なお、分析には 186 区別のデータを用いるが、図では都市別に集約した値を示している。

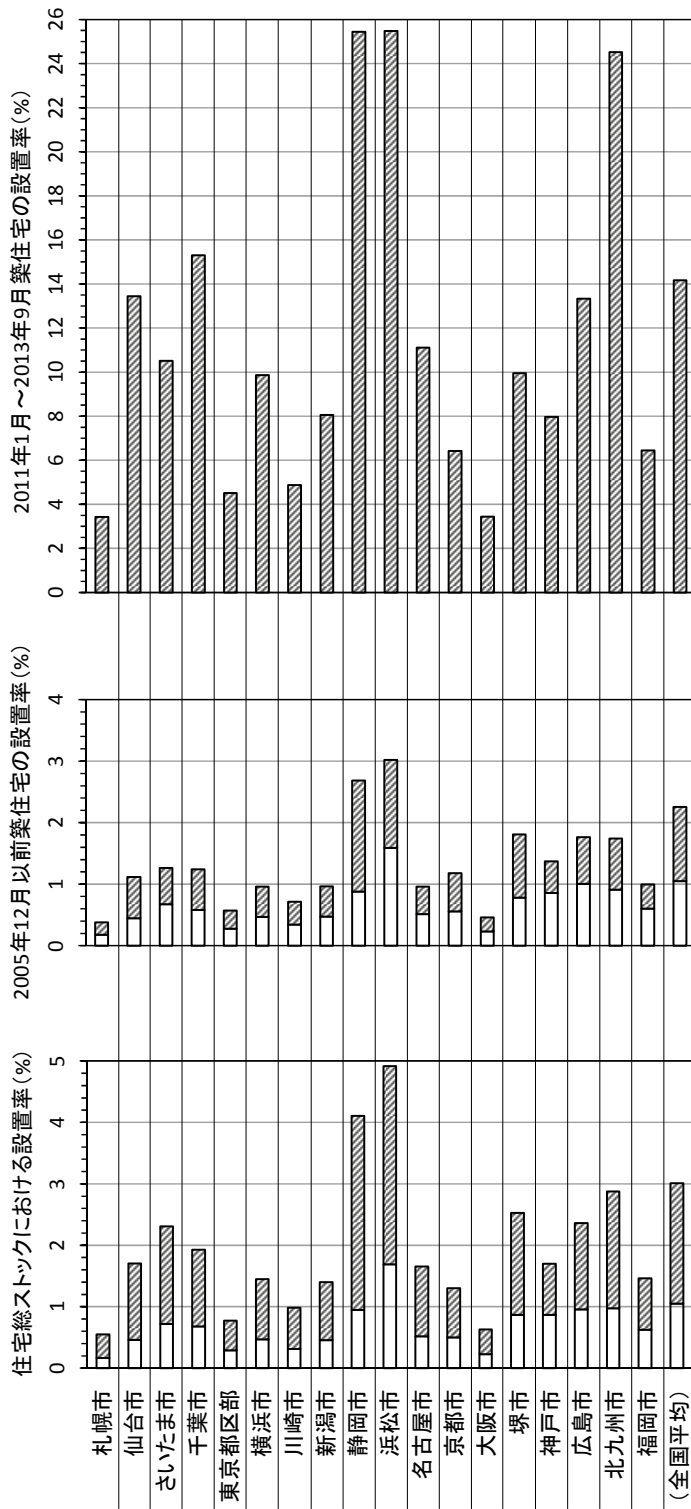


図1：東京都区部と政令指定都市における既築および新築住宅における太陽光発電設備の設置率

(出所) 平成20年および平成25年住宅・土地統計調査結果（総務省統計局、2010；2015）に基づき作成。

住宅・土地統計調査結果（総務省統計局、2015）からはまた、本分析に用いる説明変数のうち、全住宅に占める 1980 年以前築住宅の割合、低層住居専用地域に建てられている住宅の割合、家計を主に支える者の年齢が 65 歳以上である世帯の割合、および単独（すなわち世帯人員 1 人）世帯の割合の値を参照している。

さらに、新エネルギー・産業技術総合開発機構の年間月別日射量データベース（MONSOLA-11）<sup>6</sup>による年平均水平面日射量（川崎市については値が示されていないので、最寄りの横浜市の値を利用）、住宅着工統計調査結果（国土交通省、2012）による 2011 年の新設着工住宅数に占める注文住宅の割合、環境ビジネス編集部（2011）の調べによる標準的設置容量である 4kW の太陽光発電システムを住宅 1 軒に設置する場合の 2011 年度における自治体からの補助金額についても、説明変数として用いる。

分析ではさらに、住民の環境意識に関わる変数として、米国とドイツを対象とした先行研究を参考に、2012 年 12 月に施行された第 46 回衆議院議員総選挙の開票結果（総務省、2012）のうち比例代表選挙における総得票数に占める民主党（当時）の得票数の割合を採用する。これは、当時の民主党は政権与党であった 2010 年に固定価格買取制度の導入などの強力な温室効果ガス排出削減措置を盛り込んだ地球温暖化対策基本法案を閣議決定するなど、太陽光発電などの再生可能エネルギーの積極的な導入等によって温室効果ガス排出の大幅な削減を目指す政党であるとみられていたからである。

既築住宅での設置率増分と新築住宅での設置率に対して、それぞれを説明するのに適切と思われる変数を用いて回帰分析を試みた結果の例を表 1 に示す。

表 1 から分かるように、既築と新築のいずれの住宅においても、日射量と単独世帯割合が設置率に対してそれぞれ正および負の関連を有する。設置補助金は特に既築住宅に対して設置を促す効果が認められる。また、新築住宅に関しては、比較的ゆとりのある住環境を有するであ

表 1：東京都区部と政令指定都市における住宅用太陽光発電設備設置率の重回帰分析例

(a) 2005 年 12 月以前築住宅の設置率増分		(b) 2011 年 1 月～2013 年 9 月築住宅の設置率	
変数	回帰係数	変数	回帰係数
定数項	-0.0387***	定数項	-0.6985***
水平面日射量 (kWh/m <sup>2</sup> ・日)	0.0133***	水平面日射量 (kWh/m <sup>2</sup> ・日)	0.2148***
1980 年以前築住宅割合	-0.0105*	低層住居専用地域住宅割合	0.0789*
65 歳以上が主に家計を支える世帯の割合	0.0140*	注文住宅割合	0.1303***
単独世帯割合	-0.0219***	単独世帯割合	-0.1581***
設置補助金額 (万円 /4kW)	$8.8 \times 10^{-5}$ **	設置補助金額 (万円 /4kW)	$4.05 \times 10^{-4}$
民主党得票割合 (衆院比例)	0.0168*	民主党得票割合 (衆院比例)	0.3244**
F 検定統計量	23.48***	F 検定統計量	28.19***
自由度調整済 R <sup>2</sup> =0.4217		自由度調整済 R <sup>2</sup> =0.4686	

(注) \*\*\*: 1% 有意、\*\*: 5% 有意、\*: 10% 有意をそれぞれ表す。



ろう低層住居専用地域に建築された住宅や注文住宅の割合が高い区において設置率が高い傾向にあることが示されている。これらの結果は、既往分析からの知見ともおおむね整合的である。

既築住宅への設置に関しては、1980年以前築住宅割合が高いほど設置率が低い傾向にあることが示されている。このような住宅は経年劣化が進んでいる上に、新耐震基準の導入（1981年）より前の建築物であるために耐震性の懸念もあって、設置が敬遠されていることが考えられる。また、65歳以上が主に家計を支える世帯の割合が高いほど既築住宅への設置率が高い。子育てを終え、自宅の改修時期を迎えた世代が、固定価格買取制度の導入の後押しもあって設置を行ったことが推察される。

最後に、2012年の衆議院議員総選挙での比例代表選挙における総得票数に占める当時の民主党の得票割合に着目すると、既築と新築のいずれの住宅においても、この割合が設置率と正の関係を有するとの結果が得られた。これは、米国やドイツでの先行研究と同様に、政治的思想信条が設置意向に影響を及ぼす可能性を示唆するものである。

なお、上に示した回帰分析には改善の余地が多く残されていることを強調しておきたい。説明変数の選定について多様な可能性を検討するほか、対象地域として他の都市を加える、変数の時系列変化を扱う、あるいは次に示すような近隣住民間の情報交換による影響を考慮するなど、より頑健な知見を得られるように分析を拡張することが求められる。

### 3.3. 近隣効果の可能性

住宅用太陽光発電システムの普及には、上述のような各種の属性要因に加えて、近隣住民どうしの受動的あるいは能動的な情報交換、すなわち近隣効果も影響しうる。これは、情報の交換をイノベーションの普及過程の本質とする理論（ロジャーズ、2007）に基づく考え方であり、太陽光発電システムの普及においても情報伝達の効果が存在することが示唆されるが（Jager, 2006；内田・氷鮑、2008）、それを実証するためにはシステムの普及の空間的分布に関する高い解像度のデータが必要であり、既往の研究例は限られている。

実証研究の先駆けとなったのは、Bollinger and Gillingham（2012）による米国カリフォルニア州での郵便番号別の区域ごとの普及データに基づき、ある区域でのシステム設置が同区域内の追加的な設置確率を高めることを示したものである。同様の研究は日本において関ら（2013；2014）が自治体別普及データを用いて実施している。ただし、設置事例の視覚的認知や近隣住民間の口コミの影響を観るには分析対象の区域が広過ぎるきらいがある。

小規模区域単位での普及データを用いることによって近隣効果の詳細、例えば近隣効果が確認される距離について実証を行った研究は、データの利用可能性の限界のために極めて少なく、筆者の知る限り表2に示した3例に過ぎない。これらの例からは、近隣効果がおおむね1kmまでの近隣範囲で働きうることが示唆される。この種の研究はまだ発展途上であり、知見の蓄積が待たれる。

表 2：住宅用太陽光発電システム普及の近隣効果の検証例

評価対象地域	近隣効果が確認された距離	出所
米国コネチカット州	4 マイル (≒ 6.4 km) 以内 (特に 1 マイル ≒ 1.6 km 以内で顕著)	Graziano and Gillingham (2015)
ドイツ全土	1 km 以内	Rode and Weber (2016)
ドイツ全土	200 m 以内	Rode and Müller (2016)

(注) Rode and Weber (2016) は 2009 年までの普及データを用いたのに対して、Rode and Müller (2016) は 2010 年までのデータを用いている。

## 4. 今後の住宅用太陽光発電システム普及に関する分析研究の課題

### 4.1. 将来の普及動向に関する学際的研究の必要性

住宅用太陽光発電システムは、科学技術的な面で重要な研究対象である一方、その普及につれて、2.2 節で述べたような社会経済的・人間心理的な意義や課題も顕在化しつつある。住宅用太陽光発電に関する主要論文数でみても、図 2 に示すように自然科学系の論文数が多くを占めているものの、近年、自然科学系に 5 年ほど遅れる形で人文社会系の研究論文数も伸びてきている。

住宅用太陽光発電システムの普及が進んでいく中で、2.2 節に示したようなメリットを享受しつつ課題の顕在化を抑止するためには、3 節で紹介したようなさまざまな普及要因の分析を踏まえつつ、将来、どの地域でどれだけ導入が進むのかの予測を行うことが求められる。この予測計算を応用すれば、各地の導入量を誘導するための効果的な政策手段を検討することにもつながる。

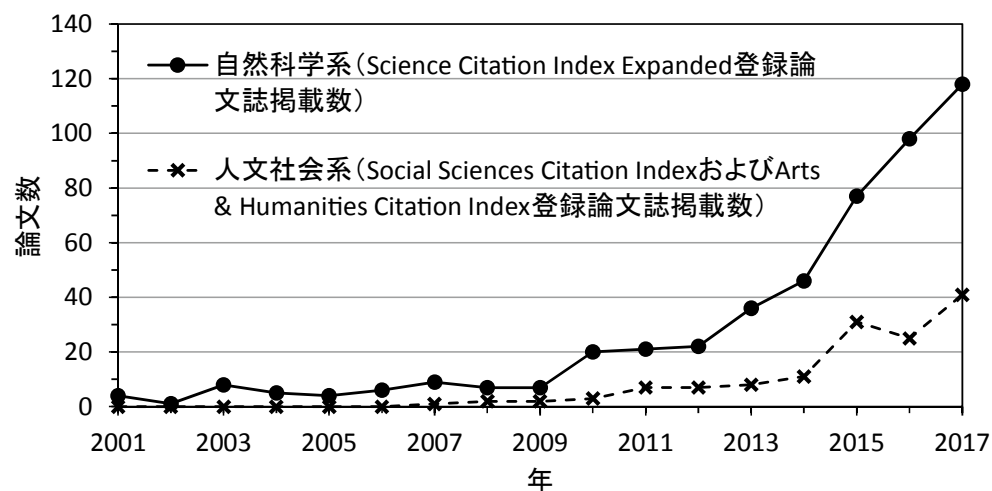


図 2：自然科学系と人文社会系分野における住宅用太陽光発電に関する主要論文数の推移  
(出所) Web of Science<sup>7</sup>にて「solar」「photovoltaic」「residential」をキーワードとしてトピック検索を行った結果から作成。

普及量の予測にはシミュレーションの技法が有用である。素朴な方法としては、生物の個体数増殖過程を模擬するロジスティック方程式を用いることが考えられるが（根岸ら、2016）、実際には、予測に当たって考慮すべき要因は多岐にわたる。導入の意思決定は個々の住民（世帯）が行うものであり、それらの住民は各種普及要因に関わる属性について異なる特徴をそれぞれ有するのみならず、近隣効果等を通じて互いに影響を及ぼしあう。このような個人単位の異なる行動の積み重ねからなる集団の動きを模擬するためにはエージェントベースシミュレーションの適用が期待され（三上、2009）、太陽光発電の普及に適用した研究も近年行われつつある（Murakami, 2014；Zhao et al., 2017）。この種の研究を進めるためには、電力の需給量という技術的に扱える要素だけではなくて、多様な社会的、心理的な要素を定量的に扱うことが必要となる。

さらに、社会の構造は時間の経過とともに変化することにも注意しなければならない。例えば、日本においては少子高齢化に伴って都市の人口・世帯の構造が変わりつつある。個々の都市の状況については紙面の制約上言及を避けるが、日本全体を俯瞰してみると、国立社会保障・人口問題研究所（2013）によれば一般世帯総数は2020年頃にはピークを迎えてその後は減少する一方、単独世帯数は2030年頃までは増加を続け、一般世帯総数に占める割合は2010年には32.4%であったところ2035年には37.2%にまで増加すると推計されている（出生中位・死亡中位ケースの場合）。このような状況では、太陽光発電システム設置に好適な戸建住宅の新築件数が伸びることは期待しがたい。

3.2節に示した回帰分析においては、単独世帯割合が太陽光発電の設置率と負の関係を有することが示唆されたが、この関係は、図3に示すように単純な相関分析からも明らかである。すなわち、世帯構造の変化が住宅用太陽光発電システムの普及拡大を抑える要因となりうる。

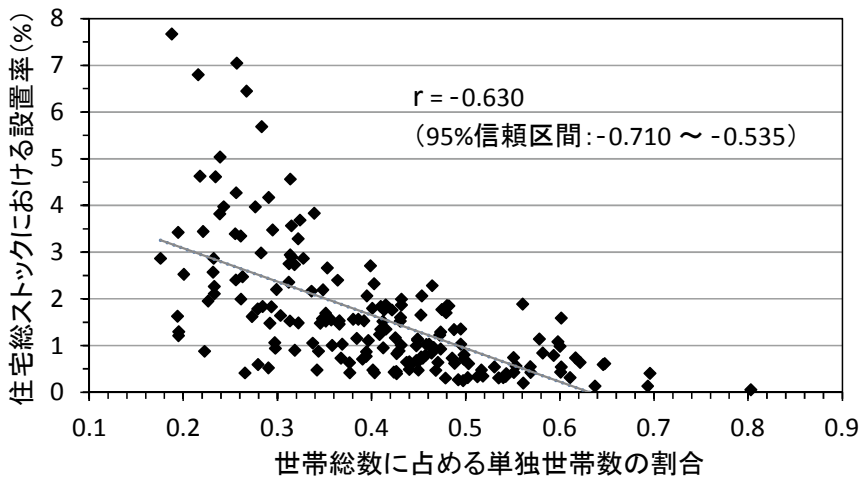


図3：東京都区部と政令指定都市の各区における住宅用太陽光発電システム普及率と単独世帯割合との関係（2013年9月時点）

（出所）平成25年住宅・土地統計調査結果（総務省統計局、2015）に基づき作成。

以上みてきたように、住宅用太陽光発電システムの普及と、社会経済の状況および個人の意識・行動の変化とは、互いに複雑に影響を及ぼしあっていることが分かる。そのため、システムの普及メカニズムの分析においては自然科学だけではなく社会科学、人文科学の知見を結集した学際的なアプローチが求められる。

#### 4. 2. 太陽光発電システムの大量普及社会の構築に向けた市民参加の必要性

住宅用に設置するエネルギー供給機器には、ガス給湯器、太陽熱温水器のほか、ガスエンジンや燃料電池の発電システムがあるが、太陽光発電システムは系統連系によって発電量のうち家庭で消費しきれない余剰分が発生した時にそれを売電できるという点で、他の機器とは性格を異にする。この特長から、太陽光発電システムの普及は、電力に関して従来の消費者（コンシューマ）から消費と生産（プロダクション）の両方を行うプロシューマへと市民の立場を変えることになる（菱沼・岡本、2011）。

このように市民の立場が変わることによる影響の予測は難しいが、懸念されるのは、システムを設置した住宅に住むプロシューマ側と、従来のコンシューマ側との経済面・心理面での隔たりである。すでに固定価格買取制度の導入以来、自宅にシステムを購入・設置できた世帯は売電により収入を得られる一方で、そうでない世帯では、電気料金に再生可能エネルギー発電促進賦課金が加算されることによる負担増だけが生じている。2.2節でも述べたように、システムの設置能力の有無による住民間の格差・不公平感の拡大が心配される。

一方、太陽光発電システムの設置者の意識としては、鶴崎ら（2017）によるアンケート調査によれば満足度は総じて高いものの、一部ではあるが、太陽光パネルが住宅の美観を損ねている、配線ミスにより発電量にロスが生じた、施工者の過失により住宅に損害を受けた、などの苦情も散見されている。また、消費者庁の事故情報データベース<sup>8</sup>によれば、太陽光発電システムに絡む火災等の事故が起きていることが確認できる。

さらに太陽光発電システムの普及が進んだ都市においては、発電出力が不安定な太陽光発電を有効に利用するために蓄電池や電気自動車を住宅や電力系統に連系し、さらに、インターネットで情報をやり取りできるいわゆるスマート家電製品の運転を自動的に操作することによってデマンドリスポンスを行う、という状況が想定される。すなわち、都市内に存在する発電、蓄電、電力消費機器のそれぞれの運用状況の情報を管理し、効率的に電力需給を行うことになる。近年提案されているスマートコミュニティはこの状況を目指すものであり、都市のエネルギー自立、レジリエンスの観点からも好ましいと考えられるが、市民はこの状況変化を抵抗なく受け入れるであろうか。

スマートコミュニティへの居住の意向に関して田頭・馬場（2011）が行ったアンケートによれば、家電や電気自動車の蓄電池の使用状況を情報提供することや、これらの機器を遠隔操作されることに対する抵抗感が挙げられている。また、太陽光発電をエネルギー源の一つとするのは不安だとする意見もあったようである。

住宅用太陽光発電システムの普及拡大と、その延長線上にあるスマートコミュニティ化は、

CO<sub>2</sub>を排出せず化石燃料に頼らない再生可能エネルギーを活用した電力供給システムを作り上げる上で一つの理想像であるが、小野田（2015）が指摘しているように、議論が供給側に偏っているきらいがあり、そのコミュニティで生活する市民の意向が十分に反映されるようにはみえない。エネルギー以外のさまざまなインフラのみならず、住民間の社会的なつながりなどを含めた真に良好なコミュニティという意味での（広義の）スマートコミュニティ（細野、2000）が住民にとって本来望ましい姿であるとするれば、太陽光発電システムの大量導入とプロシューマの増加・（狭義の）スマートコミュニティ化の議論には、都市におけるコンフリクトの存在する他の諸課題の場合と同様に市民参加が重要な役割を果たすべきだろう（小幡、1992）。

#### 4.3. 多様な関係者の議論の基盤となる情報提供面での現状と課題

都市における太陽光発電の将来のさらなる普及拡大に関する学際的研究や市民参加を促すためには、議論を行う上での共通の基盤となる各地の日照量、設置量、設置費用、発電・売電状況、経年劣化や廃棄などの情報が十分に提供されていることが前提となる。とりわけ市民参加の観点からは、こうした情報が地図などを用いて分かりやすく示されていることが望ましい。

日照量については、3.2節で参照した新エネルギー・産業技術総合開発機構によるデータベース閲覧システムが、日本国内各所の毎時の日射量をユーザフレンドリな形式で詳しく示している。ただし、提供している地図はあまり高精細とは言えない。高精細の日照量地図を示している例として、米国ニューヨーク州における情報を示すNY Solar Map<sup>9</sup>が挙げられる。

設置状況については、国内には複数の情報源がある。資源エネルギー庁は、固定価格買取制度下での毎月の設備認定量を2012年7月から都道府県別、2015年からは加えて市区町村別についても示している<sup>10</sup>。また、サンプル調査による推計値として、3節でも参考にした住宅・土地統計調査によって太陽光発電機器を設置している住宅数の推計値が5年ごとに市区町村別に示されているほか、全国消費実態調査によって太陽光発電システムの世帯普及率の推計値が5年ごとに都道府県別・主要都市別に示されている<sup>11</sup>。これらは表形式での提供であり必ずしもユーザフレンドリとは言えず、また、3.3節で紹介したような近隣効果についての実証研究を行うには集計地域単位が大きい。ドイツ全土を対象とした近隣効果の実証研究が進んでいるのは、再生可能エネルギー法に基づき固定価格買取制度の適用対象となる太陽光発電システムの位置情報を公開するというドイツ連邦政府の方針による（Rode and Weber, 2016）。また、オーストラリアでは再生可能エネルギー庁の資金提供によりAustralian PV Institute Solar Map<sup>12</sup>と称して郵便番号区域別の詳しい普及状況を地図等を用いて示しているほか、上述のNY Solar Mapでは、ニューヨーク州内の郡別、さらには各郡内の自治体別の普及状況と設置費用を地図上で分かりやすく示している。さらに、太陽光発電システムの販売会社が独自に、自社が設置したシステムの位置を示した地図をWebページに載せている例もある。

発電・売電状況については、筆者が知る限り国内には十分な公開統計データは存在せず（固定価格買取電力量は地域別の値は公表されていない）、現状では、各地の日照量と設置容量が

ら推計するか、鶴崎ら（2017）が行ったような設置者へのアンケートによって把握することになる。

今後、太陽光発電システムの設置から時間を経るにつれて、同じ日照量・設備容量であっても経年劣化に伴って発電出力が低下することが予想される。また、システムの主な構成要素である太陽電池モジュールの供用開始から廃棄に至るまでの寿命は20年～30年程度と見積もられているが、20年以上前のシステム導入実績は少ないため、実寿命については情報が不足している。経年劣化や寿命・廃棄の実態に関するデータ収集と提供の体制が構築されることが望まれる。

## 5. おわりに

住宅用太陽光発電システムの普及は、地球レベルでの環境・エネルギーの課題とみられがちなCO<sub>2</sub>排出の抑制と化石燃料消費からの脱却に対して、個々の都市が主導的に貢献できる可能性を示している。言い換えれば、地球温暖化とエネルギーの問題は、都市が積極的に扱うべき政策課題となってきたことを意味する（下田、2014）。現実においても、太陽光発電システムの大量普及とともに蓄電池や電気自動車と連系させ都市内の電力需給を高度化するという意味でのスマートコミュニティが都市の将来像として提示され、その実現に向けて技術開発が進んでいる。

しかし、太陽光発電システムの普及は、技術的な要素だけではなく、都市とその住民に関わるさまざまな社会経済的・心理的要素と密接な関わりを有することに注意しなければならない。本稿で行った既往研究からの知見に基づく考察と筆者による追加的な普及要因分析から示されたように、システムの普及は、都市における社会経済の状況のみならず個々の住民の意識や行動、あるいは住民どうしの関係にまで影響を及ぼしうる。逆に、システム設置に関する財政的支援に加えて、人口・世帯、その他の社会経済的属性および、住民の思想信条や住民間の情報交換が、普及を決定づける要因にもなる。システムが都市に浸透していくことが、少子高齢化、経済格差、災害、情報セキュリティといった従来から指摘されている都市政策課題と影響を及ぼしあうのである。

以上のことから、都市における太陽光発電システムの普及に関してCO<sub>2</sub>排出削減という効果は一つの側面に過ぎず、今後の普及のあり方の検討においては、従来主に採られてきた科学技術的アプローチだけでなく、人文社会科学の見地を取り入れた学際性や市民参加が求められる。その際、議論を促すための基盤となるような統計情報の整備とそのユーザフレンドリーな提供を進めていくことも必要となるだろう。

太陽光発電システムとスマートコミュニティに関する議論を契機として、都市と環境・エネルギーの両分野が融合した領域における研究が発展することを期待したい。

## 謝辞

筆者が立命館大学に着任して以来、長年にわたり持続可能性に関わる環境政策研究について貴重な示唆を与えてくださった小幡範雄教授に厚く御礼申し上げます。また、住宅用太陽光発電システムの普及分析の動向に関してさまざまな助言をくださった大阪大学の下田吉之教授と宇都宮共和大学の吉田肇教授に感謝いたします。なお、本稿で示した分析の一部は、立命館大学アジア・日本研究推進プログラム「政策科学研究によるアジア都市論の再構築」プロジェクト（リーダー：吉田友彦教授）の一環として行われたものである。

## 注

- <sup>1</sup> 固定価格買取制度のもとで認定されているが運転開始に至っていない太陽光発電設備の容量が2016年度末時点で51.0GWあり（うち50.2GWが非住宅用）、これらがすべて設置されれば累積導入容量は合計90.1GWとなって（資源エネルギー庁、2017）、長期需給エネルギー見通しによる2030年の目標を超えることになる。
- <sup>2</sup> Grübler and Fisk（2012）による2005年時点での推計に基づく。
- <sup>3</sup> C40世界大都市気候先導グループ、[http://doc.future-city.jp/pdf/H23\\_forum/C40.pdf](http://doc.future-city.jp/pdf/H23_forum/C40.pdf)（2017年12月22日アクセス）
- <sup>4</sup> 平成28年度（2016年度）住宅市場動向調査（国土交通省住宅局、2017）によれば、太陽光発電装置の整備率は注文住宅において39.5%であるのに対して、分譲戸建住宅では15.1%、分譲マンションでは3.4%との結果が示されている。
- <sup>5</sup> 北海道札幌市、宮城県仙台市、埼玉県さいたま市、千葉県千葉市、神奈川県横浜市、川崎市、新潟県新潟市、静岡県静岡市、浜松市、愛知県名古屋市、京都府京都市、大阪府大阪市、堺市、兵庫県神戸市、広島県広島市、福岡県北九州市、福岡市の17市
- <sup>6</sup> 新エネルギー・産業技術総合開発機構：日射量データベース閲覧システム、<http://app0.infoc.nedo.go.jp/>（2017年12月22日アクセス）
- <sup>7</sup> クラリベイト・アナリティクス：Web of Science、<https://webofknowledge.com/>（2017年12月25日アクセス）
- <sup>8</sup> 消費者庁：事故情報データベースシステム、[http://www.jikojocho.go.jp/ai\\_national/](http://www.jikojocho.go.jp/ai_national/)（2017年12月22日アクセス）
- <sup>9</sup> ニューヨーク市立大学：NY Solar Map、<https://nysolarmap.com/>（2017年12月22日アクセス）
- <sup>10</sup> 資源エネルギー庁：固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト、[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/saiene/statistics/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/)（2017年12月22日アクセス）
- <sup>11</sup> 総務省統計局：政府統計の総合窓口－全国消費実態調査、<https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL02100104.do?tocd=00200564>（2017年12月22日アクセス）
- <sup>12</sup> Australian PV Institute Solar Map：<http://pv-map.apvi.org.au/>（2017年12月22日アクセス）

参考文献

- Bollinger, B., Gillingham, K. (2012) "Peer effects in the diffusion of solar photovoltaic panels," *Marketing Science*, 31(6), 900-912
- Caird, S., Roy, R., Herring, H. (2008) "Improving the energy performance of UK households: Results from surveys of consumer adoption and use of low- and zero-carbon technologies," *Energy Efficiency*, 1(2), 149-166
- Graziano, M., Gillingham, K. (2015) "Spatial patterns of solar photovoltaic system adoption: The influence of neighbors and the built environment," *Journal of Economic Geography*, 15(4), 815-839
- Grübler, A., Fisk, D. (Eds.) (2012) *Energizing Sustainable Cities: Assessing Urban Energy*, Routledge
- International Energy Agency (IEA) (2017) *World Energy Outlook 2017*, OECD/IEA
- Jager, W. (2006) "Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: A behavioural perspective," *Energy Policy*, 34(14), 1935-1943
- Kwan, C. L. (2012) "Influence of local environmental, social, economic and political variables on the spatial distribution of residential solar PV arrays across the United States," *Energy Policy*, 47, 332-344
- Li, F., Qian, X., Zhou, W. (2012) "Principal component analysis of residential solar power system utilization in Japanese cities," *Studies in Regional Science*, 42(4), 885-896
- Ma, S. et al. (2017) "Pricing the urban cooling benefits of solar panel deployment in Sydney, Australia," *Scientific Reports*, 7, 43938
- Murakami, T. (2014) "Agent-based simulations of the influence of social policy and neighboring communication on the adoption of grid-connected photovoltaics," *Energy Conversion and Management*, 80, 158-164
- Rai, V., Robinson, S. A. (2013) "Effective information channels for reducing costs of environmentally-friendly technologies: evidence from residential PV markets," *Environmental Research Letters*, 8, 014044
- Rode, J., Müller, S. (2016) "Spatio-temporal variation in peer effects—The case of rooftop photovoltaic systems in Germany," *ERSA Conference Paper*, No. ersa16p579
- Rode, J., Weber, A. (2016) "Does localized imitation drive technology adoption? A case study on rooftop photovoltaic systems in Germany," *Journal of Environmental Economics and Management*, 78, 38-48
- Schaffer, A. J., Brun, S. (2015) "Beyond the sun—Socioeconomic drivers of the adoption of small-scale photovoltaic installations in Germany," *Energy Research & Social Science*, 10, 220-227
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014) *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*, United Nations
- Zhang, Y., Song, J., Hamori, S. (2011) "Impact of subsidy policies on diffusion of photovoltaic power generation," *Energy Policy*, 39, 1958-1964
- Zhao, T., Zhou, Z., Zhang, Y., Ling, P., Tian, Y. (2017) "Spatio-temporal analysis and forecasting of distributed PV systems diffusion: A case study of Shanghai using a data-driven approach," *IEEE Access*, 5, 5135-5148
- 安達陽平 (2016) 「米国カリフォルニア州の太陽光導入の現状：多様なプロジェクトを展開」『海外電力』58 (10)、48-54
- 池田伸太郎、大岡龍三 (2014) 「日本国内におけるスマートシティ・スマートコミュニティ実証事業の最新動向」『生産研究』66 (1)、69-77



- 岩田和之、馬奈木俊介、金子慎治（2012）「省エネ住宅設備の購入行動の経済分析」『国際協力研究誌』19（1）、1-12
- 内田晋、氷鮑揚四郎（2008）「習熟と環境価値を考慮した再生可能エネルギーの普及モデル」『エネルギー・資源学会論文誌』29（3）、15-21
- 遠藤栄一（2012）「わが国における住宅用太陽光発電の普及分析」『電気学会論文誌 B』132（5）、478-485
- 大関崇、吉富政宣（2013）「太陽光発電の火災リスクに関して」『安全工学』52（3）、162-172
- 小野田弘士（2015）「スマートコミュニティの形成へ求められる視点」『環境管理』51（4）、51-56
- 小幡範雄（1992）『環境コンフリクト実験ゲーム－対立から共生への環境創造』技報堂出版
- 環境省地球環境局地球温暖化対策課（2013）「平成 24 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」<http://www.env.go.jp/earth/report/h25-03/>（2017 年 12 月 22 日アクセス）
- 環境省地球環境局地球温暖化対策課（2014）「平成 25 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」<http://www.env.go.jp/earth/report/h26-05/>（2017 年 12 月 22 日アクセス）
- 環境ビジネス編集部（2011）「47 都道府県・19 政令指定都市の再生可能エネ助成・誘致策」『環境ビジネス』2011 年 10 月号（通巻 112 号）、48-53
- 経済産業省（2015）『長期エネルギー需給見通し』[http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004\\_2.pdf](http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf)（2017 年 12 月 22 日アクセス）
- 経済産業省（編）（2017）『2017 年版エネルギー白書』経済産業調査会
- 河本桂一（2011）「太陽光発電システムのライフサイクル評価：既存事例とガイドライン、今後の展望」『応用物理』80（8）、679-686
- 国土交通省住宅局（2017）「平成 28 年度住宅市場動向調査について」[http://www.mlit.go.jp/report/press/house02\\_hh\\_000116.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/house02_hh_000116.html)（2017 年 12 月 14 日アクセス）
- 国土交通省（2012）「建築・住宅関係統計データ」[http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jutaku\\_list.html](http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jutaku_list.html)（2017 年 11 月 28 日アクセス）
- 国立社会保障・人口問題研究所（2013）「日本の世帯数の将来推計（全国推計）（2013 年 1 月推計）」『人口問題研究資料 329』国立社会保障・人口問題研究所
- 小林広武（2017）「太陽光発電大量導入時の電力系統への影響」『電気学会誌』137（4）、212-215
- 近藤潤次・亀田裕介（2017）「近隣の太陽光発電システムの発電電力の比較による異常検知」『スマートグリッド』2017 年 1 月号、27-32
- 資源エネルギー庁（2017）「再生可能エネルギーの大量導入時代における政策課題と次世代電力ネットワークの在り方」『総合資源エネルギー調査会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会（第 1 回）配布資料』[http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku\\_gas/saiseikanou\\_jisedai/pdf/001\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/saiseikanou_jisedai/pdf/001_03_00.pdf)（2017 年 12 月 22 日アクセス）
- 下田吉之（2014）『都市エネルギーシステム入門：住宅・建築・まちの省エネ・低炭素化』学芸出版社
- 白石賢司、Kammen, D.（2017）「住宅用太陽光発電向け固定価格買取制度の実証的政策分析」『第 36 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集』105-108
- 関知道、田中秀雄、秋澤淳（2013）「戸建住宅に対する太陽熱温水器と太陽光発電の市区町村別普及とデータを用いた普及要因分析」『太陽エネルギー』39（2）、51-58
- 関知道、田中秀雄、秋澤淳（2014）「情報伝達効果による都道府県別の戸建住宅に対する太陽熱温水器と太陽光発電の普及分析」『エネルギー・資源学会論文誌』35（3）、1-9
- 総務省（2012）「平成 24 年 12 月 16 日執行衆議院議員総選挙開票結果」[http://www.soumu.go.jp/senkyo/senkyo\\_s/data/shugiin46/](http://www.soumu.go.jp/senkyo/senkyo_s/data/shugiin46/)（2017 年 11 月 6 日アクセス）

- 総務省統計局 (2010) 「平成 20 年住宅・土地統計調査」 <http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/> (2017 年 11 月 18 日アクセス)
- 総務省統計局 (2015) 「平成 25 年住宅・土地統計調査」 <http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/> (2017 年 11 月 18 日アクセス)
- 総務省統計局 (2016) 「平成 27 年国勢調査」 <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/> (2017 年 12 月 25 日アクセス)
- 田形直己、志々目友博 (2017) 「太陽光発電の普及に伴う廃棄物発生量の推定に関する基礎的研究」『環境衛生工学研究』31 (3)、122-125
- 田頭直人、馬場健司 (2011) 「スマートコミュニティへの居住選好に関する分析」『第 30 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集』95-98
- 鶴崎敬大、湯浅和博、潮梨紗、中上英俊 (2017) 「戸建住宅における太陽光発電システムの導入者意識と発電実態」『日本建築学会環境系論文集』82 (735)、463-470
- 根岸信太郎、高山聡志、石亀篤司、出野賢一、広瀬道雄、種村健一 (2016) 「PV の普及速度とエリア出力を考慮したネット電力需要の長期的シミュレーション手法に関する検討」『電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料』PE-16-54、PSE-16-74、43-48
- 能登路裕、中川二彦 (2016) 「太陽光発電を電気自動車へ直接充電するシステムの評価」『化学工学論文集』42 (2)、48-55
- 馬場健司、田中充 (2015) 「レジリエントシティの概念構築と評価指標の提案」『都市計画論文集』50 (1)、46-53
- 菱沼祐一、岡本和久 (2011) 「スマートエネルギーネットワークとは」『日本ガスタービン学会誌』39 (3)、156-164
- 福代和宏 (2011) 「太陽光発電システム導入世帯の属性と電力消費実態」『日本建築学会環境系論文集』76 (666)、741-750
- 細野助博 (2000) 『スマートコミュニティ：都市の再生から日本の再生へ』中央大学出版部
- 本藤祐樹、馬場健司 (2008) 「エネルギー技術導入の社会心理的な影響：太陽光発電システムの設置世帯における環境行動の変化」『エネルギー・資源』29 (1)、15-21
- 三上達也 (2009) 「予測の科学－マルチエージェントモデルによる人工社会」見上崇洋・佐藤満 (編著) 『政策科学の基礎とアプローチ [第 2 版]』ミネルヴァ書房、174-187
- 安田昌司 (2016) 「地方創生に資するエネルギー自治－滋賀県におけるエネルギーの地産地消の事例－」『環境技術』45 (8)、429-435
- 吉田肇 (2012) 「地域における住宅用太陽光発電システムに対する補助支援策の展開に関する考察」『都市計画論文集』47 (3)、943-948
- エベレット・M・ロジャーズ (著)、三藤利雄 (訳) (2007) 『イノベーションの普及』翔泳社