Diffusion of innovation and policy on diffusing photovoltaic system

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2021-02-16
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 荒川, 潔
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://otsuma.repo.nii.ac.jp/records/6932

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.

イノベーションの普及と太陽光発電システムの普及政策

荒川　潔*

要　　約

近年、地球温暖化対策や化石燃料の枯渇危機などの問題から、エネルギーの効率的な利用と再生可能エネルギーの活用がエネルギー政策や産業政策などの観点から重要課題となっている。特に普及が進んでいる太陽光発電システムは分散型電源としての利用可能性が高いが、今後は費用や地理的な観点からの効率的な普及を目指す必要がある。そのためには、太陽光発電システムの普及要因を特定することで的確な普及予測を行い、効率的な普及を促す政策を立案する必要がある。本稿では、イノベーションの普及のメカニズムを説明し、太陽光発電システムの普及の要因とそれを妨げる要因について検討することで、太陽光発電システムの効率的な活用を実現するための望ましい普及政策について議論する。

1．はじめに

これまで化石燃料は世界中で最も有力なエネルギー源として見なされてきたが、CO_2 排出による地球温暖化や差し迫る石油と天然ガスの枯渇の予測などのため、多くの国々では再生可能エネルギーの有効活用を政策上の重要課題とし、産業政策の観点からも再生可能エネルギーの普及を図っている。特に太陽光を直接電力に変換し、発電や輸送のコストがかからない太陽光発電（PV）システムは分散型電源として将来性が高く普及している。分散型電源の特徴は、電力系統への接続だけでなく、電力系統に接続せずに電力の供給を実現することであり、災害時などでの電力供給の問題に対する解決策としても有効である。日本政府は2030年度の電源構成における再生可能エネルギーの割合を22～24%とすることを目指しているが、現在は15%程度に留まっており、再生可能エネルギーの効率的な普及が課題となっている。

再生可能エネルギーのようなイノベーションの普及は、様々な要因が相互に結び付いている複雑なプロセスであり、社会システムの中でのコミュニケーションの役割が重要である。イノベーションの普及には、技術的や経済的、社会的な側面による多くの不確実性が含まれており、特に再生可能エネルギーの普及のプロセスを解明するのは容易ではない（Zhai and Williams, 2012）。イノベーションの普及には、たとえイノベーションが明確な利点を持っていたとしても、長い時間がかかる（Rogers, 2003）。そのため、特に再生可能エネル

*大妻女子大学　社会情報学部

ギーのような環境的な便益を生じるイノベーションに関しては、その普及のプロセスを解明し、それを利用することが重要課題である（Brown, 2001）。本稿では、先行研究の成果をもとに、その方法論や普及のメカニズムについて説明する。

環境に便益を与えるイノベーションの普及の遅さの主な原因は購入費用の高さである（Brown, 2001）。さらにイノベーションの普及は市場の不完全な情報と関連し、そしてそれに制約されるため、その普及率は政策に強く影響される（Jaffe et al., 2005）。特に再生可能エネルギーに関しては、経済的な費用と CO_2 排出削減の環境的な便益との比較が難しく、さらには既存のエネルギーシステムとの不協和もあり、普及のプロセスが遅い（Islam, 2014）。イノベーションの採用には複雑な意思決定プロセスが内在し、一般的な消費者は持たないような高度な情報を必要とする。さらには、消費者は初期段階では完全なものとは程遠い情報しか持たない（Jager, 2006）。そして技術的観点からは、PV パネルの耐用性、コンポネントの故障、運用の信頼性などの問題もある。このような意思決定を遅らせる要因が PV システムの普及を妨げる最大の要因である。そのため、PV システムの購入のサポートに対しては十分な配慮が必要である（Orioli and Gangi, 2014）。このような市場の失敗に対しては、普及を促す政策を実施することで、投資による利益を増大させ、普及率をスピードアップさせることができる。

PV システムの導入においては、消費者は経済的な利益に関心を示すため、潜在的な消費者に対する経済的なアプローチは大変有効である（dos Santos, 2018）。再生可能エネルギーの導入を直接刺激する政策にはフィードイン・タリフ（Feed-in Tariff, FIT）や課税所得控除などがある。FIT とは、電力を販売する消費者に対して、市場の電力の販売価格よりも高い価格を支払う仕組み、つまり、発電された再生可能エネルギーの電力に対する金銭的な報酬を支払う仕組みのことである。このタリフ（電力会社への売電価格）の変化は投資に大きな影響を与えるため、再生可能エネルギーの投資においては正味現在価値や内部収益率などの分析が重要である。FIT は再生可能エネルギーの導入を促す主要なインセンティブであり、多くの国々で再生可能エネルギー市場を育成するために採用されている。そして FIT は CO_2 排出を削減するという点でも最も効果的な政策の一つであると考えられている（Castaneda et al, 2018）。しかしながら、FIT の運用には財政負担の増大という問題を伴うため、近年、各国で FIT に代わる普及政策が検討され実施されている。本稿では、PV システムの普及のための政策の効果を検討することで、望ましい普及政策について議論する。

本研究の構成は以下の通りである。2 節ではイノベーションの普及の特徴を説明する。そして普及を分析するモデルとして、3 節では Bass モデル、4 節では離散選択モデル、5 節ではシステムダイナミックスを説明する。6 節では PV システムの普及の現状と問題点を指摘し、普及を促すための政策の効果について検討する。7 節では結論を述べる。

2. イノベーションの普及

普及という概念は、社会や経済の中の個人や企業が新しい技術を採用したり古い技術を新しいものに置き換えたりするプロセスを説明する際によく用いられる（Peres et al., 2010）。製品のイノベーションの導入と却下におけるオピニオンリーダーの役割は古くから認識されており（Trade, 1903）、これまでも宣伝や口コミなどの要因が製品のイノベーションの普及に重要な影響を与えることが指摘されてきた（Bass et al., 1994）。社会や経済のグローバル化は、イノベーションの普及を説明する初期の研究で想定されていた領域を拡大し、イノベーションの普及における内的や外的な要因の影響を考慮する研究につながった（Massiani and Gohs, 2015）。

イノベーションは社会システムの中でコミュニケーション、特に新しいアイディアと結びついたメッセージによる特別なコミュニケーションを通して伝播する。また、イノベーションの普及は、社会の動きに影響される消費者間の相互関係を含

む新しい製品やサービスの市場への浸透のプロセスであると定義することができる（Peres et al., 2010）。このイノベーションの浸透のプロセスにおけるコミュニケーションと相互作用との関係などの要因が重要となるにつれ、普及に関する研究の範囲は拡大し複雑になっている（Huarng et al., 2015）。例えば、イノベーションの普及におけるコミュニケーションや技術の可視性、ソーシャルメディアなどの役割（Bollinger and Gillingham, 2012; Graziano and Gillingham, 2014）、イノベーションの普及率にピア効果が与える重要性（Palm, 2017）なども議論されている。

これまで見てきたような製品のイノベーションと比較して、技術のイノベーションの普及には異なる点がいくつかある。まず､技術のイノベーションの普及は、導入のリスクとスイッチングコストが高いため、製品のイノベーションと比べると複雑である。そして、技術の導入者は基本的には企業であり、導入の決定には関連する設備や技術の有無なども影響する（Huarng et al., 2015）。また、技術のイノベーションの導入のスピードは、業界の競争環境に強く影響する（Gatignon et al., 1989）。

再生可能エネルギーに対するインセンティブ政策は技術のイノベーションの普及を促し、電力市場を競争的にするとともに、再生可能エネルギーの魅力を高めることとなった。特に普及が進んだPVシステムの費用の低下は技術の競争力を高めるとともに業界の効率性を増大させたため、導入のインセンティブを高める政策の効果とともに製品のイノベーションを強力に促進した（Lee et al., 2012）。

技術のイノベーションにおいては、ラーニング効果により更なる費用低下と普及の促進が期待されている（Kumar and Krishnan, 2002）。例えば、イノベーションが遅れて導入される国は、イノベーションが数年早く導入されるリードした国のイノベーションを導入することから大きな便益を得る。つまり、リード国は導入の経験からより多くの製品や技術の情報を学ぶための十分な時間と機会を得るが、ラグ国は製品や技術の社会における認知度や受容性を向上でき、イノベーションを導入する際のリスクを低下させ、市場の浸透を加速させることができる（Kalish et al., 1995）。そして、これらの国の間ではリード・ラグ効果と呼ばれるイノベーションの普及率に有意な違いが生じる（Munshi, 2004）。ラーニング効果は国境をまたぐ普及に影響を与えるため、イノベーションがある地域に独立的に浸透するのはほとんど不可能である。したがって、国家間や地域間における相互作用の関係は技術のイノベーションの普及に重要な役割を果たしている（Robertson and Gatignon, 1986）。

3. Bassモデル

Bass（1969）によって提案されたBassモデルはイノベーションの普及を説明する際、最も広く用いられているモデルである。このモデルはイノベーションの普及の基礎的な理論であり、時間の経過とともに市場の普及率がS字型の曲線を描く状況を説明している。Bassモデルは新製品の販売の予測のためのツールとして導入され、このモデルを用いることで、導入者の意思決定の結果としての新製品の成長を予測することができる。このモデルは新製品の普及に関するモデルで最も一般的なものの一つであり、マーケティング戦略や技術の管理などの他の分野でも広く用いられている。

このモデルにおいては、潜在的な消費者の導入に関する意思決定はマスメディアや宣伝のような外的なものと、社会的相互作用や口コミなどの内的なものの2つの情報源によって影響されると想定されている。そして、その2つの情報源は2つの異なるグループの導入者を生じさせる効果を持つ。1つ目はイノベーターと呼ばれる外的な情報源だけに影響されるグループである。2つ目は、イミテーターと呼ばれる内的な情報源だけに影響を受ける、つまりポジティブなフィードバックのあるグループである。イミテーターは、既に新製品を購入している数多くの導入者から内的な情報を得ることで影響を受ける。つまり､イノベーター

は販売の成長を駆り立てるが、イミテーターは普及があるレベルに達したら、購買行動を起こすことになる。

Bassモデルでは、消費者が新製品を時間 t において採用する確率を、イノベーション係数 p とイミテーション係数 q を用いて定義する。予測期間においては、イノベーターの採用確率はイノベーション係数と同じであるが、イミテーターの採用確率はイミテーション係数と採用率の累積との積で定まる。時間 t まで製品を採用しないという条件の下での時間 t で製品を採用する確率は、以下のように表される。

$$\frac{f(t)}{1-F(t)} = p + \frac{q}{m}N(t)$$

ただし、$f(t)$を時間 t での採用率の分布関数、$F(t)$を時間 t での採用率の累積分布関数、m を十分な普及の時間がかかって技術を採用した消費者の人数である最終的な潜在市場、$N(t)$ を採用者の累積数とする。なお、潜在市場 m は普及のプロセスで実現できる最大の採用者を表し、その値は一定であると想定されている。ダイナミックな潜在市場 $m(t)$ を用いることで柔軟的な構造とすることができる（Mahajan and Peterson, 1978）。

Bassモデルは、製品の寿命が普及のプロセスと整合するようデザインされており、冷蔵庫や冷凍庫、テレビ、エアコン、乾燥機などのS字型の曲線で示される新製品の普及をとてもよく反映している。つまり、このモデルは、販売量がクリティカルマスを過ぎると製品の普及のスピードは急激に増大するが、製品市場が飽和点に達すると普及の増加率は急激に低下する状況を表している。

普及モデルの初期の適用は主に政府の政策の影響がない技術に関して行われてきたが、破壊的なイノベーションの普及においては、政策による普及プロセスへの影響を無視できない（Ruan et al., 2014）。Bass et al.（1994）はマーケティングミックス戦略の効果を考慮するために、Bassモデルに一般的な関数を導入することで拡張した。そして、その構造が極めて一般的であるために、マーケティング戦略以外の外的な要因を考慮するために様々な形式に拡張された（Radomes and Arango, 2015）。このように、政策などの外的な要因が普及プロセスに影響を与えるとき、Bassモデルを拡張することでそのような介入の影響を扱うことができる（Guidolin and Mortarino, 2010）。その拡張は政策などのように普及と相互作用する介入の効果を分析するのに適している（Guseo et al., 2007）。例えば、Yamaguchi et al.（2013）は、マーケティングの影響を考慮し、大阪市でのPV市場の普及を分析している。また、Kumar and Krishnan（2002）は、ラーニング効果を考慮するためBassモデルを拡張している。

Bassモデルでは、市場での普及を研究する際に利用できるデータがほとんどない場合、同じ国での別の製品やサービス、別の国での同じ製品やサービスなどのデータを利用することで、他の市場のパラメータを用いて分析することができる。また、Bassモデルが他の普及モデルよりも好まれる重要な理由の一つは、単にモデルの予測がデータに合致するからではなく、理論的根拠により理解できる解釈を提供するからである（Guidolin and Mortarino, 2010）。理解できる解釈が欠けているのであれば、データに合致するだけでは不十分である。

しかしながら、普及における初期段階のデータだけを用いたのでは、Bassモデルによる普及全体の予測には大きな不確実性を伴う。理論的には時系列データをもとにパラメータ化した普及曲線で分析することはできるが、実際にそれを実行するには真の普及曲線の形が明確となるほどの長期間のデータが必要である。もしそのような長期間のデータがなければ、イノベーションの普及の初期段階の予測は、潜在的な市場の大きさや理論的な普及曲線における現在の位置づけなどの重要な仮定に依存することになる。そして、それらの仮定から逸脱すると予測に重要な誤差を生じることになる。したがって、このモデルの分析においては、様々な過程に依存していることを前提とした結果の解釈が必要である。

4. 離散選択モデル

離散選択モデルでは、消費者は製品の様々な属性を考慮して効用を最大化する選択を行い、消費者の選択結果は離散数であるカテゴリカルな変数となると考える。このモデルはこのように被説明変数が質的変数やカテゴリカルな変数である場合の統計的分析に用いられる。離散選択モデルは消費者の意思決定を分析するのに適した手法であり、イノベーションの普及に関しても適用することができる（Lee et al., 2012）。離散選択モデルには、multinomial logit モデル、probit モデル、mixed logit モデルのように様々な形式のモデルがあるが、multinomial logit モデルが推定の容易さから最も広く用いられている。この multinomial logit モデルは、観察された消費者の効用である確定項と誤差項で構成される確率効用モデルをベースとしており、以下のように表される。

$$U_{ni} = \beta x_{ni} + \epsilon_{ni} = V_{ni} + \epsilon_{ni}$$

ただし、n は消費者、i は選択肢、x は製品の属性ベクトル、β は推定する係数ベクトルである。この場合、消費者 n による選択肢 j を選ぶ確率は以下のように表される。

$$\begin{aligned} P_{nj} &= \mathrm{Prob}(V_{ni} + \epsilon_{ni} < V_{nj} + \epsilon_{nj}, \forall i \neq j) \\ &= \mathrm{Prob}(\epsilon_{ni} < \epsilon_{nj} + V_{nj} - V_{ni}, \forall i \neq j) \end{aligned}$$

上式での誤差項 ϵ_{ni} は確率変数であるから、このモデルはどの確率分布を仮定するのかで結果が異なる。Multinomial logit モデルはタイプ I の極値分布を仮定しており、選択肢 j が選ばれる確率は以下のようになる。

$$P_{nj} = \frac{e^{V_{nj}}}{\sum_i e^{V_{ni}}} = \frac{e^{\beta' x_{nj}}}{\sum_i e^{\beta' x_{ni}}}$$

これは数学的に導出された閉形式であり最尤法によって推計できる。

このモデルでは消費者の選択に影響を与える要因、例えば、政府のインセンティブ（Diamond, 2009）やイノベーション（Kloess and Müller, 2011）などを取り入れることができる。Liu and Cirillo（2018）は generalized dynamic discrete choice model を用いて、次世代自動車の普及要因と政策の効果を検証している。Ma et al.（2019）は mixed logit model を用いて、補助金以外の電気気自動車の普及政策の効果について検討し、走行規制を免除するなどの政策が効果的であることを明らかにしている。

5. システムダイナミックス

システムダイナミックスとは、複雑な社会システムの分析や政策提言のためのシミュレーションモデルによる分析手法のことである（Forrester, 1961）。この手法はフィードバックのある複雑なシステムの研究や管理を目的としたものであり、技術や経済、社会、管理などの様々な要素をつなぐ首尾一貫した概念のモデルである。産業から社会科学に至る多くの分野で適用され、自然科学や工学の分野にも広がっている。

環境に良い複数のイノベーションが競争し、そして絶対的に有利なイノベーションが存在しないような状況では、イノベーションの普及には長い時間と費用を必要とするので、複数のイノベーションが互いに成長することは困難である。そのため、市場の初期におけるわずかな技術的な優位性を持つイノベーションによって生じる市場シェアの差は、市場の成長とともにフィードバック効果によって急激に拡大する。この手法の主要な要素はこのようなフィードバックループであり、他のエージェントやシステム全体の決定に影響を与えるエージェントの決定のメカニズムを表すことができる。システムダイナミックスのシミュレーションのモデルは、ストックとフローの概念によって、変数間の複雑な因果関係を表すことができる。ストックはシステムの状態を特徴づけて決定を下す基礎となる情報を生じる。そして決定はフローとなり、ストックを変化させることでフィードバックループを閉じさせる（Sterman, 2000）。この手法は非線形常微分方程式を用いた

分析によって説明できる。このシステムダイナミックスは複雑なシステムの理解を促し、意思決定の強化によってより良い成果へ導くことを目的としている。

イノベーションの普及では、要因間においてフィードバックと相互作用があると考えることができる。つまり、イノベーションの普及では、ポジティブなフィードバックによる急激な成長によってイノベーションの成功が実現するとともに、ネガティブなフィードバックがイノベーションの成長を制限するという成長パターンが生じる。そのようなフィードバック効果は回帰分析によってパラメータを推定する手法では分析できないため、Bass モデルや離散選択モデルによってそのようなダイナミックなメカニズムを考えるのは困難である。システムダイナミックスはそのようなフィードバックの構造によるシステムのダイナミックな行動を分析する際に広く用いられている。

システムダイナミックスはフィードバックと相互作用との関係を表すのに適しており、また循環する因果関係を分析するのに有用である。システムダイナミックスのモデルでは、ループや変数の追加などによって構造を変化させることで、社会や技術、経済、政策、管理などの側面から普及のプロセスを分析することができる。システムダイナミックスは、PV システムの普及（Movilla et al., 2013）などエネルギー分野の研究で多く用いられている。また、離散選択型の消費者選択モデルと Bass モデルを統合し、消費者の選択とイノベーションとの循環的な因果関係を含むダイナミックな相互作用を分析することができる（Struben and Sterman, 2008）。

6．PV システムの普及要因と政策

再生可能エネルギーへの移行は、技術的な問題だけでなく、イノベーションによる社会変化の受容性などの社会文化的な問題にも直面する。持続可能な移行が成功するにはコミュニティの構築が重要である（Süsser and Kannen, 2017）。ここでは、PV システムの普及を促す要因とともに、普及を阻害する要因を明らかにする。そして、普及を効率的に促すための政策についても検討する。

PV システムの普及の要因については、家庭市場においては、電力系統から電力を容易に利用できるかどうか（Faiers and Neame, 2006）、他の PV システム導入者からの影響（Jager, 2006）、FIT（Simpson and Clifton, 2015）などが重要である。また、家庭市場での PV システムの普及は、消費者の数が膨大であるため破壊的な潜在性を持っている。また、電力系統に接続される分散化された PV システムでは運用上の問題がいくつか生じるため、電力会社と消費者との関係の解明が重要である（Romero et al., 2016）。破壊的なイノベーションの場合、イノベーションの持つ新しい価値が普及を妨げる要因となることがある（Wan et al., 2015）。そのため、政府や規制当局はイノベーションが普及するための環境を整備する重要な役割を担う（Ruan et al., 2014）。

PV システムは非連続的なイノベーションであり、イノベーションに内在するリスクの認識とともに、PV システムの便益の認識が普及に強く影響する（Vasseur and Kemp, 2015）。家庭市場での PV システムの普及を妨げる要因としては、PV のパネルに関する親しみの欠如（Jager, 2006）、情報の欠如（Ray et al., 2016）、メンテナンスの必要性（Zhai and Williams, 2012）などがあげられる。このように、潜在的な導入者が PV システムの導入に関する詳細な情報を持たない場合、それが普及を阻害する主な要因となる。また、PV システム導入における所得と学歴の関係（Sardinaou and Genoudi, 2013）や環境に対する関心（Islam, 2014）なども議論されている。

PV システムに関しては、Bass モデルによる分析が数多くなされており、例えば、Denholm et al.（2009）はアメリカを事例として市場浸透予測モデルを構築した。また Guidolin and Mortarino（2010）は日本やドイツなどの国々のパラメータ推定を行い、国によって投資の決定とインセンティブの関係が異なることを明らかにしている。さらに、国によって普及段階が異なるので、それぞれの強み

に応じた政策が必要であるとしている。Lang et al.（2016）は屋根に設置するPVパネルで自家消費する際の経済的パフォーマンスを評価し、その経済性の高さを明らかにしている。Balali et al.（2017）は電力系統と接続したハイブリッドネットワークを構成するPVや風力発電のシステムの経済性を分析している。Lund（2011）はグリッドパリティに着目した分析を行い、再生可能エネルギーの普及のためには電気料金の上昇が必要であるなどの結論を得ている。Ayompe et al.（2010）は、タリフ・パリティモデルを用いて電力系統に接続したPVシステムを様々な状況を想定して分析し、グリッドパリティが実現する時期や環境を分析した。

PVシステムの初期において普及に成功した国として日本とドイツがあげられる。1990年代の初頭では両国とも再生可能エネルギー産業は大きくなかった。しかし、グローバルな地球温暖化や化石燃料の枯渇の問題への解決策として太陽光のエネルギーを有効に活用するためにPVシステムに対する需要が政策によって刺激されると、国内に強い産業基盤と市場を構築したのである（Zhang et al., 2011）。日本やドイツは日射量が乏しいものの、その強い経済を生かしてPVシステムの研究開発と商業化を政策によってサポートした。PV産業の裾野が広がるにつれてPVシステムの生産費用は低下し、それが普及を促す原動力となった（Nemet and Husmann, 2012）。日本とドイツは、PV産業のリーダーとなり、エネルギー供給のセキュリティーと環境問題を政策的に効果的に統合することに成功した。

PVシステムは世界中に広がり、多くの国々でPVシステムの導入が拡大した。近年では、中国がドイツからPV産業におけるリーダーの座を奪い、国内での効率的な生産を可能としている（Huang et al., 2016）。現在、世界レベルでPVシステムの導入が急増しているが、導入の増加率は個々の市場で異なっている。このことは、PVシステムの普及率は、政策に強く影響されることを意味している（Reinsberger et al., 2015）。日本とドイツの初期の成功は、政府による強い関与が普及を効果的に促すことを示している。このように、個々の国の規制やインセンティブは、PVシステムがどのように普及するかに大きな影響を与える（Zhao et al., 2011）。

PVシステムの普及における主なインセンティブの一つはFITである。これはPVシステムなどの再生可能エネルギーで発電した電力を電力系統に供給した発電者にプレミアムの価格を支払うことで、再生可能エネルギーの導入を効果的な方法で促進するための手法である（Zahedi, 2010）。FITで定めるタリフはPVシステムの導入による利益を直接決定するので、FITの制度設計がPVの普及に大きな影響を与える（Ossenbrink, 2017）。

しかしながら、FITの運用には多大な財政負担を必要とするため、その費用対効果が問われている。例えば、FITによって急激にPVシステムを普及させたドイツでは、日射量が乏しい地域での高コストなFITの運用が議論となり、望ましいフィードインの政策デザインが検討され、タリフのレベルを市場の成長に合わせて低下させるメカニズムを構築した（Wand and Leuthold, 2011）。イタリアでも同様にFITによりPVシステムの導入が急拡大したが、多大なFITの負担が議論となり、PVシステムの普及が大きく減速した（Antonelli and Desideri, 2014）。日本においても、補助金に関する議論の中でPV産業は競争可能なレベルに達したと判断され、2011年までに補助金が低下し、PVシステムの普及が停滞した（Zhang et al., 2011）。PVシステムの普及を促進するFIT以外の政策に関する研究は数多くなされている。例えば、Dong et al.（2017）は投資税額控除などの税制やネットメータリングなどの政策の効果を分析している。Adepetu and Keshav（2016）は、PVパネルと蓄電池を統合したシステムの普及に対する導入費用の補助などのいくつかの政策の効果を比較分析している。

PVシステムの便益においては運用パターンなどによって大きな偏差が生じるため、PVシステムの効率的な普及には、このことを考慮する必要がある。さらに経済的や環境的な効率性は地理的

に大きく変化する。Cai et al.（2013）は、住宅用のPVシステムの導入における価格の地理的な変化やエネルギー利用の不均一性の影響を分析した。そして、普及率は燃料費が高かったりエネルギーの利用が大きかったりするしたことを経験した消費者の間でより大きいことを示した。このような利用パターンや地理的な不均一性に対処する方法として、Carrie Armel et al.（2013）は、スマートメーターによりエネルギー使用に関する家庭固有の情報を提供し、それによりエネルギー効率化の個別化されたプログラムを知らせることによる対策が効果的であることを示した。また、Inhoffen et al.（2019）はタリフが高い場合、日射量が小さくPVシステムの発電には適していない地域での普及が進むという非効率性が生じる可能性を指摘した。CO_2をより排出する電力を利用している地域に対する政策の効果は、排出が少ない地域に対するものより大きい。エネルギーの効率化による便益が行動や地理による不均一性に依存しているにもかかわらず、多くの政策ではエネルギー効率化のプログラムの目的であるエネルギーの節約を増大させるようには最適化されていない。このような問題に対しては、Guidolin and Mortarino（2010）が指摘するように、地域ごとの特性を見極めたうえでの個別の政策が必要となるだろう。

7. 結論

本稿では、イノベーションの普及のメカニズムを説明し、PVシステムの普及の要因とそれを妨げる要因について検討した。そしてPVシステムの普及のための政策の効果を検討することで、望ましい普及政策について議論した。以下では、得られた成果をもとに、今後の日本でのPVシステムの効率的な普及を実現するための研究課題を検討したい。

日本の現在の電源構成における再生可能エネルギーの割合は15%程度であり、2030年度の目標である22～24%とするには、再生可能エネルギーの効率的な普及が課題となっている。2019年から電力固定価格買取制度（FIT）の終了が開始したが、電力の買い取り価格が大きく低下するため、余剰電力の有効活用が問題となっている。その際、蓄電池を用いた自家消費や地域で余剰電力を取りまとめて管理するアグリゲーターの役割が重要となり、地域のニーズに合致したPVシステムの有効利用と、さらなるPVシステムへの効率的な投資が重要課題となる。PVシステムの普及を適切にコントロールするためには、PVシステムの普及のプロセスをモデル化し、その分析を通じて政策の効果を検証する必要がある。またPVシステムの普及が進むと、よりリスクに敏感な消費者が導入の検討を始めることになる。リスク許容の度合いに応じたリスク軽減策をとるためには、PVシステムの普及と消費者のリスク回避度の関係を分析する必要がある。その際、フィードイン・プレミアムのようなタリフによる政策や、システム導入に対する補助金の供与などが考えられる。消費者が新技術の導入による将来の費用削減をどのように評価するのかについては、Hausman（1979）以降、数多くの研究がなされている。もし、消費者が導入費用と比べて将来の費用の割引現在価値にあまり反応しないのであれば、エネルギーの効率化に対して過小評価していると見なすことができる。PVシステムの導入に対しても、消費者は導入費用と将来の電力費用を比較検討して決定すると考えられる。その場合、消費者が導入費用を重視するのであれば、設置に対する補助金の方が効果的となる。このようにどのようなリスク軽減策が望ましいのかについては、消費者の将来の費用削減効果をどのように評価しているのかに依存するため、このことを解明するのが課題である。PVシステムなどの再生可能エネルギーの普及を図る政策は全国一律的であるため、地域の実情に合わせた普及のコントロールが必要である。つまり、不適な地域での設置を抑止し、望ましい土地での設置を誘導する必要がある。そのためには、地域の文化や産業、気象などの様々な要因を組み合わせて分析する必要がある。市町村単位といった詳細なレベルでの需要分析によるイノベーションを普及させるメカニズムの解明も今後の課題である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（研究課題番号18K01579）の助成を受けている。

参考文献

Adepetu A, and S. Keshav (2016) Understanding solar PV and battery adoption in Ontario: an agent-based approach. Proceedings of the seventh international conference on future energy systems, 5, 1–12.

Antonelli, M., and U. Desideri (2014) The doping effect of Italian feed-in tariffs on the PV market. Energy Policy, 67, 583–594.

Ayompe, L.M., A. Duffy, S.J. McCormack, and M. Conlon (2010) Projected costs of a grid-connected domestic PV system under different scenarios in Ireland, using measured data from a trial installation. Energy Policy, 38, 3731–3743.

Balali, M. H., N. Nouri, E. Omrani, A. Nasiri, and W. Otieno (2017) An overview of the environmental, economic, and material developments of the solar and wind sources coupled with the energy storage systems. International Journal of Energy Research, 41, 1948–1962.

Bass, F. M. (1969) A new product growth model for consumer durables. Management Science, 15, 215–227.

Bass, F. M., V. T. Krishnan, and D. Jain (1994) Why the bass model fits without decision variables. Marketing Science, 13, 203–223.

Bollinger B, and K. Gillingham (2012) Peer effects in the diffusion of solar photovoltaic panels. Marketing Science, 31, 900–912.

Brown, M.A. (2001) Market failures and barriers as a basis for clean energy policies. Energy Policy, 29, 1197–1207.

Carrie Armel, K., A. Gupta, G. Shrimali, and A. Albert (2013) Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity. Energy Policy, 52, 213–234.

Castaneda, M., S. Zapata, and A. Aristizabal (2018) Assessing the effect of incentive policies on residential PV investments in Colombia. Energies,11, 2614.

Chini, C. M., K. L. Schreiber, Z. A. Barker, and A. S. Stillwell (2016) Quantifying energy and water savings in the U.S. residential sector. Environmental Science & Technology, 50, 9003–9012.

Denholm, P., E. Drury, and R. Margolis (2009) Solar Deployment System (SolarDS) model: Documentation and sample results. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.

Diamond D. (2009) The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: evidence from US states. Energy Policy, 37, 972–83.

Dong C, B. Sigrin, G. Brinkman (2017) Forecasting residential solar photovoltaic deployment in California. Technological Forecasting and Social Change, 117, 251–65.

Dos Santos, L.L.C., L. N. Canha, and D. P. Bernardon (2018) Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. Renewable Energy, 116, 384–401.

Faiers, A., C. Neame (2006) Consumer attitudes towards domestic solar power systems. Energy Policy, 34, 1797–1806.

Forrester, W. (1961) Industrial Dynamics. The MIT Press.

Gatignon, H., J. Eliashaberg, and T. S. Robertson (1989) Modeling multinational diffusion patterns: An efficient methodology. Marketing Science, 8, 231–247.

Graziano M, and K. Gillingham (2014) Spatial patterns of solar photovoltaic system adoption: the influence of neighbors and the built environment. Journal of Economic Geography,

15, 815–839.

Guseo, R., A. Dalla Valle, and M. Guidolin (2007) World oil depletion models: price effects compared with strategic or technological interventions. Technological Forecasting and Social Change, 74, 452–469.

Guidolin, M., and C. Mortarino (2010) Cross-country diffusion of photovoltaic systems: modelling choices and forecasts for national adoption patterns. Technological Forecasting and Social Change, 77, 279–296.

Hausman, J. A. (1979) Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables. Bell Journal of Economics, 10, 33–54.

Huang, P., S. O. Negro, M. P. Hekkert, and K. Bi (2016) How China became a leader in solar PV: An innovation system analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64, 777–789.

Huarng, K., T. Yu, and W. Lai (2015) Innovation and diffusion of high-tech products, service, and systems. Journal of Business Research, 68, 2223–2226.

Inhoffen, J., C. Siemroth, and P. Zahn (2019) Minimum prices and social interactions: Evidence from the German renewable energy program. Energy Economics, 78, 350–364.

Islam T. (2014) Household level innovation diffusion model of photo-voltaic (PV) solar cells from stated preference data. Energy Policy, 65, 340–350.

Jager, W. (2006) Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: a behavioural perspective. Energy Policy, 34, 1935–1943.

Kalish, S., V. Mahajan, and E. Muller (1995) Waterfall and sprinkler new-product strategies in competitive global markets. International Journal of Research in Marketing, 12, 105–119.

Kloess M, and A. Müller (2011) Simulating the impact of policy, energy prices and technological progress on the passenger car fleet in Austria—a model based analysis 2010–2050. Energy Policy, 39, 5045–5062.

Kumar, V., and T. V. Krishnan (2002) Multinational diffusion models: An alternative framework. Marketing Science, 21, 318–330.

Lang, T., D. Ammann, and B. Girod (2016) Profitability in absence of subsidies: a techo-economic analysis of rooftop photovoltaic self-consumption in residential and commercial buildings. Renewable Energy, 87, 77–87.

Liu, Y., and C. Cirillo (2018) A generalized dynamic discrete choice model for green vehicle adoption. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 114, 288–302.

Lee, D. H., S. Y. Park, J. W. Kim, and S. K. Lee (2012) Analysis on the feedback effect for the diffusion of innovative technologies focusing on the green car. Technological Forecasting and Social Change, 80, 498–509.

Lee, A. H. I., C. Y. Lin, H. Y. Kang, and W. H. Lee (2012) An integrated performance evaluation model for the photovoltaics industry. Energies, 5, 1271–1291.

Lund, P. D. (2011) Boosting new renewable technologies towards grid parity – Economic and policy aspects. Renewable Energy, 36, 2776–2784.

Ma, S.-C., J.-H. Xu, and Y. Fan (2019) Willingness to pay and preferences for alternative incentives to EV purchase subsidies: An empirical study in China, Energy Economics, 81, 197–215.

Mahajan, V., and R. A. Peterson (1978) Innovation diffusion in a dynamic potential adopter population. Management Science, 24, 1589–1597.

Mahajan, V., E. Muller, F. M. Bass (1990) New product diffusion models in marketing: a review and directions for research. Journal of Marketing, 54, 1–26.

Massiani, J., and A. Gohs (2015) The choice of Bass model coefficients to forecast diffusion for

innovative products: An empirical investigation for new automotive technologies. Research in Transportation Economics, 50, 17–28.

Munshi, K. (2004) Social learning in a heterogeneous population: Technology diffusion in the Indian green revolution. Journal of Development Economics, 73, 185–213.

Nemet, G. F., and D. Husmann (2012) PV learning curves and cost dynamics. Semiconductors and Semimetals, 87, 85–142.

Orioli A, and A. Di Gangi (2014) Review of the energy and economic parameters involved in the effectiveness of grid-connected PV systems installed in multi-storey buildings. Applied Energy, 113, 955–69.

Ossenbrink, J. (2017) How feed-in remuneration design shapes residential PV prosumer paradigms. Energy Policy, 108, 239–255.

Palm A. (2017) Peer effects in residential solar photovoltaics adoption—A mixed methods study of Swedish users. Energy Research & Social Science, 26, 1–10.

Peres R, E. Muller, and V. Mahajan (2010) Innovation diffusion and new product growth models: a critical review and research directions. International Journal of Research in Marketing, 27, 91–106.

Rai, V., D.C. Reeves, and R. Margolis (2016) Overcoming barriers and uncertainties in the adoption of residential solar PV. Renewable Energy, 89, 498–505.

Radomes, A. A., and S. Arango (2015) Renewable energy technology diffusion: an analysis of photovoltaic-system support schemes in Medellín, Colombia. Journal of Cleaner Production, 92, 152–161.

Reinsberger, K., T. Brudermann, S. Hatzl, E. Fleiss, and A. Posch (2015) Photovoltaic diffusion from the bottom-up: Analytical investigation of critical factors. Applied Energy, 159, 178–187.

Robertson, T. S., and H. Gatignon (1986). Competitive effectives on technology diffusion. Journal of Marketing, 50, 1–12.

Rogers, E. (2003) Diffusion of Innovations. The Free Press, New York, NY.

Romero Aguero, J., A. Khodaei, and R. Masiello (2016) The utility and grid of the future: Challenges, needs, and trends. IEEE Power and Energy Magazine, 14, 29–37.

Ruan, Y., C. C. Hang, and Y. M. Wang (2014) Government's role in disruptive innovation and industry emergence: The case of the electric bike in China. Technovation, 34, 785–796.

Sardinaou, E., and P. Genoudi (2013) Which factors affect the willingness of consumers to adopt renewable energies? Renewable Energy, 57, 1–4.

Simpson, G., and J. Clifton (2015) The emperor and the cowboys: the role of government policy and industry in the adoption of domestic solar microgeneration systems. Energy Policy, 81, 141–151.

Sterman, J. D. (2000) Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw Hill, Boston: Irwin.

Süsser D, and A. Kannen (2017) 'Renewables? Yes, please!': perceptions and assessment of community transition induced by renewable-energy projects in North Frisia. Sustainability Science, 12, 563–78.

Tarde, G. (1903) The Laws of Imitation. Henry Hold and Company, New York.

Vasseur, V., and R. Kemp (2015) The adoption of PV in the Netherlands: A statistical analysis of adoption factors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 483–494.

Wan, F., P. J. Williamson, and E. Yin (2015) Antecedents and implications of disruptive innovation: Evidence from China. Technovation, 39–40, 94–104.

Wand, R., and F. Leuthold (2011) Feed-in tariffs for

photovoltaics: Learning by doing in Germany? Applied Energy, 88, 4387–4399.

Zahedi, A. (2010) A review on feed-in tariff in Australia, what it is now and what it should be. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 3252–3255.

Zhai, P., and E. D. Williams (2012) Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. Renewable Energy, 41, 350–357.

Zhang, Y., J. Song, and S. Hamori (2011) Impact of subsidy policies on diffusion of photovoltaic power generation. Energy Policy, 39, 1958–1964.

Zhao J, E. Mazhari, N. Celik, and Y.-J. Son (2011) Hybrid agent-based simulation for policy evaluation of solar power generation systems. Simulation Modelling Practice and Theory, 19, 2189–2205.

Diffusion of innovation and policy on diffusing photovoltaic system

KIYOSHI ARAKAWA
Department of Social Information Studies, Otsuma Women's University

Abstract

In recent years, issues related to global warming and fossil fuel depletion, promotion of energy efficiency, and the use of renewable energy have become crucial from the perspective of energy and industrial policies. The concept of photovoltaic system as a renewable energy source is gradually gaining popularity; however, it should be diffused efficiently in terms of costs and geography in the near future. Such diffusion requires planning policies to promote efficient installation of photovoltaic system by identifying factors influencing investment and predicting the spread of such innovation. This study discusses desirable policies on the diffusion of photovoltaic system by explaining the mechanism of diffusion of such innovation with factors both stimulating and preventing diffusion and verifying the policies.

Key Words（キーワード）

innovation（イノベーション），diffusion（普及），renewable energy（再生可能エネルギー），photovoltaic system（太陽光発電システム）