

固定価格買取制度による 住宅用太陽光発電設備の普及に関する研究*

鈴木皓太、納見浩太、宮本隆太郎、
小山隼汰、坂西祐弥、水上元、吉田孝平

1. 本論文の問題意識と方法

「固定価格買取制度」（以下 FIT 制度）とは¹⁾、再生可能エネルギーで発電した電気を、電力会社が一定の価格で買い取る制度である。日本では 2012 年 7 月 1 日より導入されたまだ新しい制度である。その買取費用は、電気の需要家全員から電気消費量 1kwh 単位で賦課金として徴収される。

この制度の目的は、再生可能エネルギーの導入を促進することである。再生可能エネルギーは、従来の発電方法に比べて発電コストが高く、また設備設置コストも高い。FIT 制度は、固定価格買取りによって発電収益の安定化と設置コストの回収の見通しを立ちやすくすることで、その普及を促進しようとするものである。

再生可能エネルギー発電の中で、太陽光発電は次のような位置づけとなっている。資源エネルギー庁『長期エネルギー需給見通し（案）』（2015）によれば、2030 年総発電電力量に対してその 7% 程度を太陽光発電によって供給するとしている。また、再生可能エネルギー全体で供給する電力量は、総発電電力量の 22~24% 程度としている。よって、再生可能エネルギーによる総発電電力量に対して、太陽光発電はその 29~31% 程度を供給することが期待されている。

太陽光発電設備を導入する家庭は、発電した電気を自家消費することにより、その分の電気購入費用を回避できる。FIT 制度のメリットは、そうした電力支出の節約に加えて、自家消費しなかった余剰電力を、電力会社に固定価格で売電できることにある。それによって得られる収入は、設備導入のインセンティブとなる。

海外では FIT 制度が日本に先立って導入され、再生可能エネルギーの導入量も増加している。しかしながら、固定価格の過度な高価格設定による急激な導入量の増加、また送

* 社会科学総合学院赤尾健一教授の指導の下に作成された。

配電能力の制約により、逆潮流問題や電気料金の急激な上昇など様々な問題が起きている。

そこで本論文では、FIT 制度を運営していくうえで、日本で起こりうる問題を明らかにするとともに、問題を回避する方策を考察する。具体的には、以下の分析を行う。

- (1) 海外で発生している FIT 制度の導入に伴って発生した問題を分析し、日本で起こりうる問題を検討する。
- (2) 住宅用太陽光発電設備が FIT 制度によってどのように普及していくのか、その普及経路をモデル分析によって明らかにする。
- (3) さらに、固定価格の設定や住宅用太陽光発電設備の設置費用が、普及経路にどのような影響を及ぼすかを見る。

2. 国内外の FIT 制度と太陽光発電の状況

海外における太陽光発電設備の導入は、日本と比べ早い時期から行われてきた。それは再生可能エネルギーの導入目標量の設定や FIT 制度の施行により後押しされてきた。本節では、はじめに国ごとの太陽光発電設備設置容量と電気料金の推移についてまとめ、次に太陽光発電導入目標量と発生した問題についてまとめる。なお海外の調査対象として、FIT を早期から導入したドイツとスペイン、また日本と同じく他地域との電力融通網を持たないハワイの3地域を選んだ。

2-1. 各国の太陽光発電設備設置容量および電気料金の推移

表1は各国の太陽光発電設備の累積設置容量と電気料金の推移をまとめたものである。いずれの国も設置容量の増加に伴って電気料金が上昇していることがわかる。買取対象となる太陽光発電の累積導入量が増えるに従って、買取費用の転嫁先である電気料金も上昇していくためである。

表1 各国の太陽光発電設備設置容量と電気料金の推移

ドイツ

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
累計設置容量(MW)	45	160	273	420	1080	2010	2860	4130	6078	9878	17278	24778	—	—	—	—
電気料金(¢/kwh)	13.30	14.20	15.00	16.40	17.10	18.70	22.17	26.32	32.28	31.79	31.87	35.17	33.88	38.76	39.51	—

スペイン

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
累計設置容量(MW)	1	3	7	11	22	44	141	413	3463	3630	4374	5251	6488	6687	—	—
電気料金(¢/kwh)	17.10	16.2	16.3	16.2	16.1	16.2	16.47	18.7	21.8	21.23	24.67	29.51	—	—	—	—

ハワイ

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

累計設置容量(MW)	—	—	—	—	—	—	2	4.9	13.5	26.2	44.7	85.2	199.5	158	—	—
電気料金(€ /kwh)	16.41	16.34	15.63	16.73	18.06	20.70	23.35	24.12	32.50	24.20	28.10	34.68	37.34	36.98	37.04	—

日本

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
累計設置容量(MW)	189	280	470	670	920	1190	1420	1600	1800	2340	3200	4410	6280	8650	—	—
賦課金(円/kWh)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.22	0.35	0.75	1.58

出典：太陽光発電設備設置容量は、日本貿易振興機構（2015, p.15）、CNE（2014）、Sherwood（2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014）、経済産業省資源エネルギー庁資料（2015）及び太陽光発電普及拡大センター資料（2015）による。「電気料金」はIEA（2015）、IEA（2007）、経済産業省資源エネルギー庁資料（2015）による。

注：1. 日本は太陽光発電に関わる電気料金のデータとして再生可能エネルギー発電促進賦課金を掲載した。

2. “—” はデータがないことを示す。

2-2. 太陽光発電導入目標と発生した問題

本項では各国の太陽光発電導入目標とこれまでに発生した問題を示す。

(1) ドイツ²⁾

<目標>

全エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を、2010年までに2000年時点の2.6%から2倍にすることを目標とし、2000年に制定された再生可能エネルギー法の下でFIT制度が導入された。複数回の改正を経て2014年改正再生可能エネルギー法では2050年に再生可能エネルギーが占める割合を総発電量の50%とし、太陽光発電の導入目標を総計で5200万kW、年間で250万kW/年とそれぞれに上限を設け計画的な導入を目指している。

<問題点>

ドイツではFIT制度の導入に伴って「再生可能エネルギー（EEG）割増」の増加が進んだ。EEG割増とは、広域送電網運営事業者が再生可能エネルギー発電事業者に支払った代金と電力取引所での販売諸経費の合計額と、電力取引所での販売収入との差額を電力事業者に割り振ったものを、賦課金の形で転嫁するものである。電力事業者はこれを対象となる全ての最終需要家の電気料金に上乗せして回収する。送電事業者は前年からその年にかけての実績からEEG割増を予測するが、実際の市場が予測と異なり、徴収の過不足が起きた場合は、次の年に調整される。このEEG割増によって、電気料金は2008年、2009年に1kwhあたり1.200ユーロセント（以下€cと表記）となり、その後、2010年に2.047€c、2011年に3.553€c、2012年に3.592€c、2013年に5.277€c、2014年に6.240€cと継続して上昇した。2015年は前年を下回り、6.170€cとなったが、2016年にふたたび上昇して6.354€cとなると予測されている。このような電気料金の急増は、一般家庭の負担を高め、エネルギーの貧困状態（エネルギー支出の増加がもたらす貧困）を引き起こしている。

(2) スペイン³⁾

<目標>

国家再生可能エネルギー行動計画（NREAP）によると、太陽光発電による発電量を2020年までに837万kW（2010年比で2.1倍）にすることを目標としている。

<問題点>

スペインでは以前から行われていたFIT制度において、太陽光発電の普及をいっそう増加させようという狙いのもとに、2007年に固定価格を22.98€/kWhから41.75€/kWhに大幅に引き上げた。その結果、太陽光発電設備の普及が大幅に進み、1年で約5倍の導入がなされた。しかし、本来ならば、買取コストが上がると電気料金も上昇するところ、政府が電力会社に対して、買取コスト増加分の電気料金への転嫁を認めなかったことにより、電力会社は膨大な赤字を抱えることとなった。そのため、政府は2008年に買取価格の大幅な値下げを実施し、2009年には買取りの年間上限額を設定した。さらに、2012年には新規の太陽光発電設備の買取登録を中断した。

(3) ハワイ州⁴⁾

<目標>

ハワイは発電の80%以上を火力発電に依存しており、石油輸送のコストもかさみ、電気料金は全米平均の3倍で、最も高い州である。石油依存脱却のため、州政府は再生可能エネルギー主体のシステムの確立を目指し、2030年度までに再生可能エネルギーによる発電量を全体の70%に引き上げることを公表している。

<問題点>

ハワイの電力需要のピークが夜間のため、発電出力のピークが昼間（10時～14時）の太陽光発電の影響で、一部の地域で昼間時の発電量が需要を上回って送電網への逆潮流を引き起こしている。ハワイは島であり地理的に電力網が独立していることから、他の州に余剰電力を送電する柔軟性がない。また、ハワイの太陽光発電は、比較的小規模な発電装置を電力消費地の近くに分散配置して電力の供給を行なう分散型太陽光発電システムを採用している。この発電システムは送電ロスが少ないこと、送電設備が短縮できるという利点がある一方で、送電系統と配電系統での逆潮流が起りやすいという欠点がある。

州政府は、系統接続申請の保留や太陽光発電システムにおける連携容量の制限など逆潮流への対策を講じてきた。結果的に、発電された電力のうち系統への逆潮流分に対する電力会社の買取単価を大幅に引き下げることとなった⁵⁾。一部では接続保留を解除しシステムが機能しているが、現在も州全体における逆潮流問題の解決策を模索中である。

(4) 日本⁶⁾

<目標>

日本は2012年7月より固定価格買取制度を実施した⁷⁾。2014年4月策定のエネルギー

基本計画では、2030年の太陽光による発電量を572億kWh（設備容量5300万kW）以上とすることを目標としている。

<問題点>

九州電力は、太陽光発電事業者の急増による接続量が、導入容量見通し（接続可能量）をはるかに超えたことで安定供給が困難となり、大規模な停電を引き起こす可能性があるとして、2014年9月25日から接続手続きを中断した。

日本では、接続保留とするに合理的な根拠がある場合、電力会社によって太陽光発電接続を拒否することが可能であると法律に定められている⁸⁾。したがって、逆潮流を未然に防ぐ措置を取ることが可能であるため、ハワイのような問題が起こる可能性は低い。

日本において今後問題となる可能性があるのは、ドイツあるいはスペインの事例のような、再生可能エネルギーの導入量増加に伴うFIT制度を通じたその買取費用の増大や、その転嫁による電気料金の上昇である。

3. 住宅用太陽光発電設備の普及モデル

本節では、太陽光発電設備普及のモデルを説明する⁹⁾。本論文のモデルはマーケティングで使われているアイデア（イノベーター理論やバスモデルなど）を元に考案している。つまり、新奇なものを好む「イノベーター」が最初に太陽光パネルを設定することで、口コミなどを通じて製品（太陽光パネル）の評判が上がり、新たな設置者（フォロワー）が増えて全体的な設置者数の数が増加する。このイノベーターとフォロワーの違いを、ここではリスクプレミアムの違いとしてモデル化する。リスクプレミアムの最も小さな人から太陽光パネルを購入し始める。設置者数の増加は製品に対する不確実性を排除し、その結果、リスクプレミアムのより大きい、太陽光パネルの導入に敬遠しがちな個人も購入するようになる、というのがここでの考え方である。

このようなモデルでは、各個人は最適な購入タイミングを考えることになる。購入の意思決定は、設置者数の過去の実績と予想に依存する。すなわち、すでに十分な設置者が存在していれば、製品に対する不確実性が低くなり現在の購入を後押しすることになる。一方で、今後急激に設置者数が増えると予想すれば、購入の判断に必要な情報も急激に増加し、したがって購入を先送りすることのメリットは大きくなる。

このように設置者数の推移が個人の購入タイミングを決め、同時に、個人の判断の結果、設置者数の推移が決まる。両者が一致している状態が均衡である。端的に言うと、個人の最適な購入タイミングを決めるための設置者数の予想が、実際に実現することで、その購入タイミングが実際に最適になっているという状態が、均衡（自己実現均衡）である。モデル分析の目的は、このような均衡がどのような性質をもつか、特にFIT制度に

よって、その均衡経路（設置者数の推移）がどのように影響されるかを明らかにすることである。

3-1. 記号と仮定

時点を t で表す。 t 時点での既設置者数を $n(t)$ で表す。特に現在時点 $t=0$ での設置者数を $n(0)=n_0>0$ と表す。 $n(t)$ は時間とともに増加する。その最大可能設置者数を \bar{n} で表す。

期待収益を $x(n(t))$ で表す。設置者数の増加とともに製品の情報がより確実となり、共通のリスクプレミアムが減少するため、期待収益は増加する。つまり x は n の増加関数である。

p_i が個人 i に特有のリスクプレミアムを表す。このリスクプレミアムは、その個人が太陽光を設置することに寛容的であるかを表すパラメータであり、低い人ほど他の人に比べて導入に積極的になる。逆にリスクプレミアムの高い人はリスク回避的であり、太陽光パネルの導入に関しては積極的ではない。リスクプレミアム p_i の累積分布を

$$F(p) = \int_{-\infty}^p di$$

で表す。

太陽光パネルの設置コストを $c(t)$ で表す。現実を反映して、コストは時間とともに減少することを仮定する。

FIT 制度は、太陽光パネル設置の追加的利益 $a(t)$ として表現される。すなわち、 t 時点で太陽光パネルを設置する人は、期待収益 $x(n(t))$ に加えて $a(t)$ だけ利益が増えるとする。

最後に利子率を r で表す。

3-2. 個人の最適化

各個人は既設置者数の推移についての予想の下に、自分にとって最適なタイミングで太陽光パネルを設置する。以上の記号を用いると問題は次のように表される。

$$\max_{t \geq 0} V(t), V(t) = e^{-rt} [x(n(t)) - p_i - c(t) + a(t)] \quad (1)$$

(1) の 1 階と 2 階の条件はそれぞれ次のようになる。

$$dV/dt = \{[x'(n(t))\dot{n}(t) - \dot{c}(t) + \dot{a}(t)] - r[x(n(t)) - p_i - c(t) + a(t)]\} e^{-rt} = 0 \quad (2)$$

$$d^2V/dt^2 = \{[(x''(n(t)))^2\dot{n}(t)_i + x'(n(t))\ddot{n}(t) - \ddot{c}(t) + \ddot{a}(t)] - r[x'(n(t))\dot{n}(t) - \dot{c}(t) + \dot{a}(t)]\} e^{-rt} < 0 \quad (3)$$

ただし、 $\dot{n} = dn/dt$, $\ddot{n} = d^2n/dt^2$ 等である。

(2) と (3) は最適解 t^* の必要条件であり、太陽光パネル導入の最適タイミングでは、これらの式が満たされている。

3-3. 均衡

最適解の必要条件からわかるように、最適な設置タイミングは普及経路 $n(t)$ に依存する。すべての人が $n(t)$ を予想し、その予想のもとで各人が最適なタイミングで太陽光パネルを設置することで、実際の普及経路 $n(t)$ が決まる。予想された $n(t)$ と実現する $n(t)$ が一致している状態が均衡である。

均衡普及経路 $n(t)$ は1階の条件を満たす必要がある。価値 V を時間とリスクプレミアム関数として $V(t, p_i)$ と表す。1階の条件 $\partial V / \partial t = 0$ を全微分すると次が得られる。

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} dt + \frac{\partial^2 V}{\partial p_i \partial t} dp_i = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} dt + \frac{\partial^2 V}{\partial p_i \partial t} dp_i = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} dt + re^{-rt} dp_i = 0 \quad (4)$$

よって2階の条件の符号から

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial^2 V / \partial t^2}{re^{-rt}} > 0 \quad (5)$$

を得て、時間とともにリスクプレミアムは上昇することがわかる。つまり時間とともに、より危険回避的な人も太陽光パネルを設置するようになる。

換言すると、パネルの導入に敬遠しがちであった潜在的導入者も、設置者の増加とともに徐々に導入を行っていくのだが、導入は未設置者のなかでリスクプレミアムが最も小さな人から行われる。したがって、既設置者数 $n(t)$ に対して、未設置者で最もリスクプレミアムの小さい人のそれ（あるいは既設置者で最もリスクプレミアムの大きい人のそれ）を $p(t)$ と表すと、 $n(t) = F(p(t))$ である。逆関数を使って $p(t) = F^{-1}(n(t))$ とし、これを1階の条件に代入して次の微分方程式を得る。

$$\dot{n}(t) = \frac{r[x(n(t)) - F^{-1}(n(t)) - c(t) + a(t)] + \dot{c}(t) - \dot{a}(t)}{x'(n(t))} \quad (6)$$

均衡普及経路はこの微分方程式の解として与えられる。以下、具体的なパラメータ、関数型を与えて、これを解いていく。

3-4. パラメトリックモデル

まず期待収益 $x(n)$ に関して、次の関数型を仮定する。

$$x(n) = bn + \underline{x} \text{ if } 0 \leq n \leq \frac{\bar{x} - \underline{x}}{b}, \text{ where } \underline{x}, b > 0, \underline{x} < \bar{x} \quad (7)$$

期待収益は誰も設置していない時は最低値 \underline{x} をとり、上限は \bar{x} である。上限に達するまで期待収益は線形で増加すると仮定する。

次にリスクプレミアムは一様分布すると仮定する。すると累積分布の逆関数は線形関数

$$F^{-1}(n) = dn + \underline{p}, \quad d > 0 \quad (8)$$

で表される。ここで $\underline{p} < 0$ はリスクプレミアムの最小値であり、負値を仮定している。つまりここでは、最初に太陽光発電パネルを設置した人は、期待収益よりも設置コストの方が大きいにもかかわらず、危険愛好的であったため、それを設置したと想定している。

最後に、設置コストと FIT 制度による追加利益は指数関数で表されると仮定する。

$$\begin{aligned} c(t) &= c_0 e^{-\varepsilon t} + \underline{c}, \quad c_0, \underline{c}, \varepsilon > 0; \\ a(t) &= \max \{a_0 e^{-\alpha t} - \underline{a}, 0\}, \quad a_0, \alpha > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

設置コストは初期値 c_0 から時間とともに減少し \underline{c} に近づく。同様に $a(t)$ も初期値 a_0 から時間とともに減少し $-\underline{a}$ に近づく。特に $\underline{a} > 0$ ならば $a(t) = 0$ となる時点が存在する。(9) の $\max \{\cdot, \cdot\}$ は、この時点で FIT 制度は打ち切られることを表している。ただし次節のシミュレーションでは \underline{a} に負値が用いられるため、以下では FIT 制度の打ち切りは考えない。

以上のように関数を特定化することで、(6) の微分方程式は

$$\dot{n}(t) = kn(t) + \varphi(t) \quad (10)$$

となる。ただし

$$k = r \left(1 - \frac{d}{b} \right), \quad \varphi(t) = \frac{r(\underline{x} - c_0 e^{-\varepsilon t} - \underline{c} + a_0 e^{-\alpha t} - \underline{a} - \underline{p}) - \varepsilon c_0 e^{-\varepsilon t} + \alpha a_0 e^{-\alpha t}}{b} \quad (11)$$

ここで k は既設置者が太陽光パネル普及 (\dot{n}) に及ぼす影響の強さを表すパラメータであり、 φ は設置コストの低下や FIT 制度の影響を表す項をまとめたものである。なお、 b は設置者数に対する限界収益 ($\partial x / \partial n$) であり、 d は設置者数に対する限界リスクプレミアム ($\partial p / \partial n$) である。もし $b < d$ 、すなわち設置者数が増えることによるリスクプレミアムの伸びよりも限界収益の伸びが小さいならば、最終的に太陽光パネルの設置者は減少することになる。そのような状況は現実的とは考えられないため、ここでは $b > d$ (したがって $k > 0$) を仮定する。

(10) は線形微分方程式なので以下のように陽に解ける。

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} e^{-kt} &= [\dot{n}(t) - kn(t)] e^{-kt} = \varphi(t) e^{-kt} \Rightarrow \int_0^T \frac{dn(t)}{dt} e^{-kt} dt = n(T) e^{-kT} - n(0) = \int_0^T \varphi(t) e^{-kt} dt \\ \Rightarrow n(T) &= e^{kT} \left(n(0) + \int_0^T \varphi(t) e^{-kt} dt \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \int_0^T \varphi(t) e^{-kt} dt &= \frac{r}{b} \int_0^T (\underline{x} - \underline{c} - \underline{a} - \underline{p}) e^{-kt} - (1 + \varepsilon / r) c_0 e^{-(\varepsilon + k)t} + (1 + \alpha / r) a_0 e^{-(\alpha + k)t} dt \\ &= \frac{r}{b} \left(\frac{(\underline{x} - \underline{c} - \underline{a})(1 - e^{-kT})}{k} - \frac{(1 + \varepsilon / r) c_0 (1 - e^{-(\varepsilon + k)T})}{\varepsilon + k} + \frac{(1 + \alpha / r) a_0 (1 - e^{-(\alpha + k)T})}{\alpha + k} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

より

$$n(t) = e^{kt} \left(n_0 + \frac{r}{b} \left(\frac{(\underline{x} - \underline{c} - \underline{a} - \underline{p})(1 - e^{-kt})}{k} - \frac{(1 + \varepsilon / r)c_0(1 - e^{-(\varepsilon + k)t})}{\varepsilon + k} + \frac{(1 + \alpha / r)a_0(1 - e^{-(\alpha + k)t})}{\alpha + k} \right) \right) \quad (14)$$

3-5. FIT 政策が存在しなかった場合の状況

FIT 政策が存在しなかった場合の普及経路は、(14) のモデルに $a_0 = \underline{a} = 0$ を代入することで得られる。その普及経路は次のシミュレーションで比較のために計算される。また $t \leq 0$ (FIT 制度導入以前) の普及経路も同様に表され、次の (15) となる。

$$n(t) = e^{kt} \left(n_0 + \frac{r}{b} \left(\frac{(\underline{x} - \underline{c} - \underline{p})(1 - e^{-kt})}{k} - \frac{(1 + \varepsilon / r)c_0(1 - e^{-(\varepsilon + k)t})}{\varepsilon + k} \right) \right) \quad \text{for } t \leq 0 \quad (15)$$

n_0 は 0 時点での左極限 ($n_0 = \lim_{t \rightarrow 0^-} n(t)$) で与えられる設置者数の初期値である。この (15) 式は一部のパラメータを推計するために利用される。

3-6. 初期値 n_0 の決定

本節の最後に、初期値 $n(0) = n_0$ について考察する。(10) の微分方程式から、次が得られる。

$$\dot{n}(0) = \lim_{t \rightarrow 0} \dot{n}(t) = \frac{r(b-d)}{b} n_0 + \frac{r(\underline{x} - c_0 - \underline{c} - \underline{p} + a_0 - \underline{a}) - \varepsilon c_0 + \alpha a_0}{b}$$

一方、 $t=0$ で太陽光パネルを導入した人は、それが自身にとって最適なタイミングなので、1 階の条件 (2) から、 $n(0) = n_0$ は次を満たす必要がある。

$$(b\dot{n}(0) + \varepsilon c_0 - \alpha a_0) - r(bn_0 + \underline{x} - (dn_0 + \underline{p}) - \underline{c} - c_0 + a_0 - \underline{a}) = 0$$

しかしこの 2 つの等式は同一であり、 n_0 にどのような値を選んでも (対応する $\dot{n}(0)$ を選ぶことで) 両式を満たすことができる。したがって、このモデルでは初期値は外生的に与えられ、理論的に求めることはできない。

4. シミュレーション

本節では、第 3 節のモデルを用いて FIT 制度の下での住宅用太陽光発電設備の普及予測を行う。特に FIT 制度の固定価格に関するシナリオを用意し、その価格設定が設備の普及経路にどのような影響を与えるのかを調べる。その結果を基に、第 1 節で考察した日本においておこりうる問題、すなわち FIT 制度導入に伴う設備導入件数の増加と、それによる急激な電気料金の上昇を、どのようにして防止できるかを考察する。

4-1. パラメータの設定

まずシミュレーションで用いるパラメータの値を示す。

表2 パラメータの概要

$a(t) = a_0 e^{-\alpha t} - \underline{a}$	$\alpha = 0.347, a_0 = 469,784, \underline{a} = -461,570$
$c(t) = c_0 e^{-\varepsilon t} + \underline{c}$	$\varepsilon = 0.202, c_0 = 1,020,000, \underline{c} = 1,320,000$
\underline{x}	$\underline{x} = 1214 \times 22.3 \times (0.44 + 0.56) \times 4.56 \times 8.786 \approx 1890000$
r	3%に設定 $r = 0.03$
$k = r \left(1 - \frac{d}{b} \right)$	$k = 0.02, 0.005$
b	$k = 0.02$ のとき、 $b = 58.5$ $k = 0.005$ のとき、 $b = 54.4$,
d	$k = 0.02$ のとき、 $d = 19.5$ $k = 0.005$ のとき、 $d = 45.3$
\underline{p}	$k = 0.02$ のとき、 $\underline{p} = -155,570,000$ $k = 0.005$ のとき、 $\underline{p} = -154,570,000$
n_0^-	$k = 0.02$ のとき、 $n_0^- = 857,913$ $k = 0.005$ のとき、 $n_0^- = 839,171$
n_0	$n_0 = 1,224,000$ (実績値)

次にパラメータの推定方法を説明する。

(1) \underline{x} の考え方

FIT 導入前の収益をそれとみなす。NEDO「日射量データベース」によると、1kw 発電容量に対して平均年間 1,214kwh の発電量がある。新エネルギー財団『都道府県別 kw 当たりの年間発生電力量と年間売電電力量』によると、そのうち 1994～2005 年の平均として 44%を売電し残り 56%を自家消費している。一般社団法人太陽光発電協会「平成 26 年度 住宅用太陽光発電補助金交付決定件数」によると、2014 年度の 1 世帯当たり平均発電容量は 4.56kw であり、2012 年の平均電力売買料金は 22.3 円 /kwh である。設備の耐用年数は 20 年とする。利子率を 3%として、その期待収益は

$$1214 \times 22.3 \times (0.44 + 0.56) \times 4.56 \times 8.786 \approx 1890000 \text{円}$$

と算出される。ここではこれを \underline{x} の値とした。

(2) b, d, k の導出

1994～2011 年 (FIT 実施以前) の住宅用太陽光発電の導入量を、その期間の世帯当たり平均設置容量 4.56kw で割ったものによって、過去の各年度の $n(t)$ (住宅用太陽光発電設備設置者数) とし、(20) 式から非線形最小二乗法によって推定した¹⁰⁾。ただし k を直接推定することはできなかった。このため、 k の値を 0.005～0.15 で変化させて、その値

に対応する他のパラメータを推定した。推定の結果、決定係数は k とともに大きくなることがわかった。 k が大きくなればなるほど、設置者数が期待収益に及ぼす影響が大きくなり、相対的にFIT制度に関するパラメータの影響は小さくなる。そもそも $b, d > 0$ であり、 $r = 0.03$ を仮定しているので、 $k = r(1 - d/b) < 0.03$ でなければならない。そこでここでは $k = 0.02, 0.005$ の2つのケースについてパラメータを推定し普及経路を計算する¹¹⁾。

(3) $a(t), c(t)$ の導出：2012～2015年の実績値を用いて導出した。

(4) n_0 の導出：2011年の実績値を用いた。

4-2. シナリオ

FIT制度の内容について、5つのシナリオを設定する。

Case A 4-1で実績値より推計したパラメータを用いた場合

Case B 固定価格の初期値がより高く設定された場合

Case C 固定価格の最終値がより低く設定された場合

Case D 固定価格が初期値から変わらない場合

Case E FIT制度が導入されなかった場合 (W/O FIT)

パラメータは、各シナリオに沿って以下のように設定する。

	Case A	Case B	Case C	Case D	Case E
a_0	469,784	1,000,000	469,784	469,784	0
\underline{a}	-461,570	-461,570	-600,000	-461,570	0
α	0.347	0.347	0.347	0	0

また、FIT制度とは別の普及促進策として、設置に対する補助金が給付されるという設定も検討する。そのシミュレーションでは、設置コストに関する条件が変わる。ここでは次の4つのシナリオを考えた。

Case 1 4-1で実績値より推定したパラメータを用いた場合

Case 2 設置に対して補助金が給付され、設置コストの初期値が低くなった場合

Case 3 設置コストの最終値が低くなった場合

Case 4 設置コストが初期値から変化しない場合

パラメータは、各シナリオに沿って以下のように設定する。

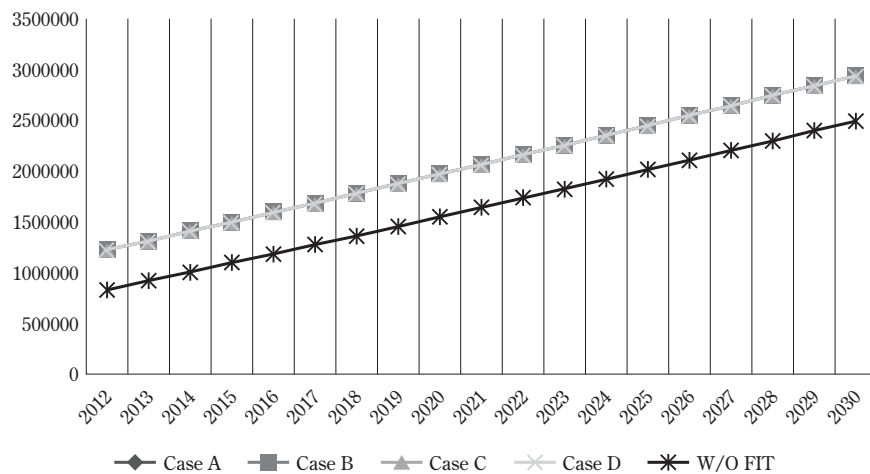
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
c_0	1020000	500000	1020000	1020000
\underline{c}	1320000	1320000	900000	1320000
E	0.202	0.202	0.202	0

4-3. 結果

4-2で示したシナリオとそれに対応するパラメータを用いて、設備の導入件数を予測した結果を以下に示す。最初に FIT 制度に関するシナリオを用いた予測である。以下の表3、図1は、 $k=0.005$ の場合を示し、表4、図2は $k=0.02$ の場合を示す。

表3 FIT 制度 各シナリオの場合の普及経路の比較： $k=0.005$ の場合

年度	Case A	Case B	Case C	Case D	Case E
2012	1224000	1224000	1224000	1224000	839171
2015	1498116	1505027	1498347	1492776	1100579
2020	1965680	1975895	1966303	1958745	1554018
2025	2447616	2458641	2448641	2441327	2023755
2030	2943104	2954505	2944542	2937881	2507138
年平均成長率 (%)	4.99	5.02	5.00	4.98	6.27

図1 FIT 制度 各シナリオの場合の普及経路の比較： $k=0.005$ の場合表4 FIT 制度 各シナリオの場合の普及経路の比較： $k=0.02$ の場合

年度	Case A	Case B	Case C	Case D	Case E
2012	1224000	1224000	1224000	1224000	857913
2015	1544259	1550853	1544478	1539161	1148961
2020	2124030	2134369	2124646	2116958	1683210
2025	2767229	2779194	2768282	2760203	2278327
2030	3479386	3492703	3480923	3472802	2937737
年平均成長率 (%)	5.98	6.00	5.98	5.96	7.08

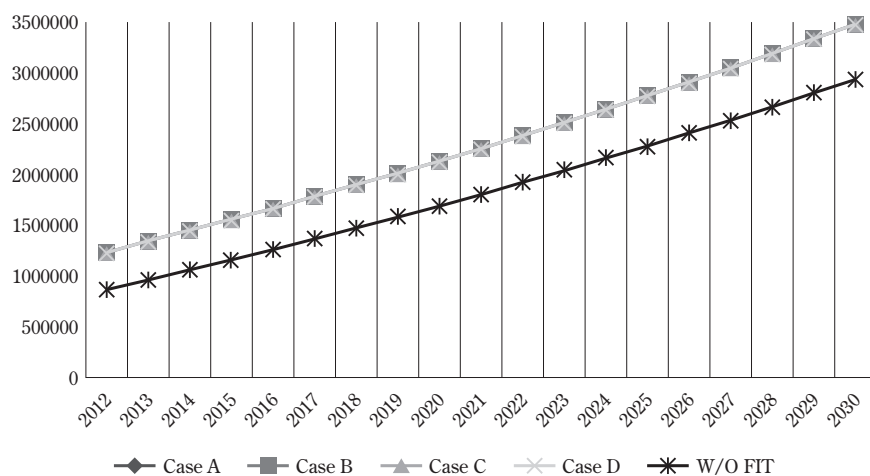


図2 FIT制度 各シナリオの場合の普及経路の比較： $k=0.02$ の場合

次に設置コストに関するシナリオを用いた予測結果を示す。以下の表5、図3は $k=0.005$ の場合を示し、表6、図4は $k=0.02$ の場合を示す。

表5 設置コスト 各シナリオの場合の普及経路の比較： $k=0.005$ の場合

年度	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
2012	1224000	1224000	1224000	1224000
2015	1485871	1490901	1486571	1494038
2020	1947580	1956602	1949470	1960685
2025	2428079	2438736	2431190	2441428
2030	2922900	2934340	2927262	2934745
年平均成長率 (%)	4.95	4.91	4.96	4.98

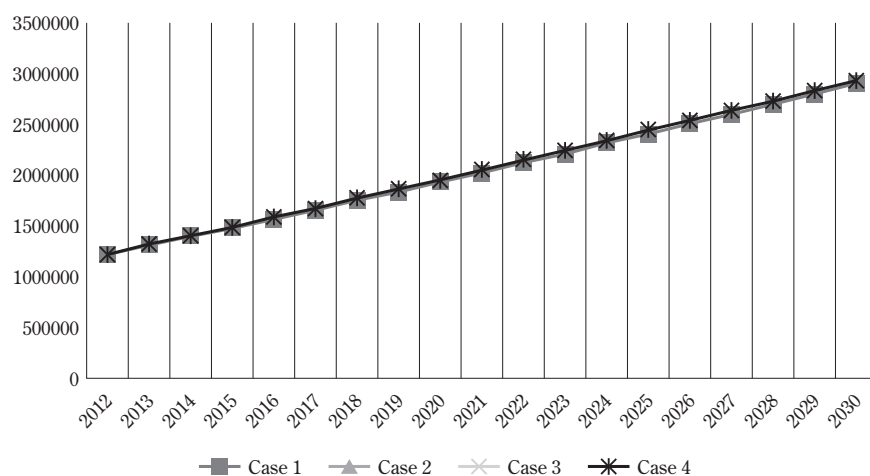
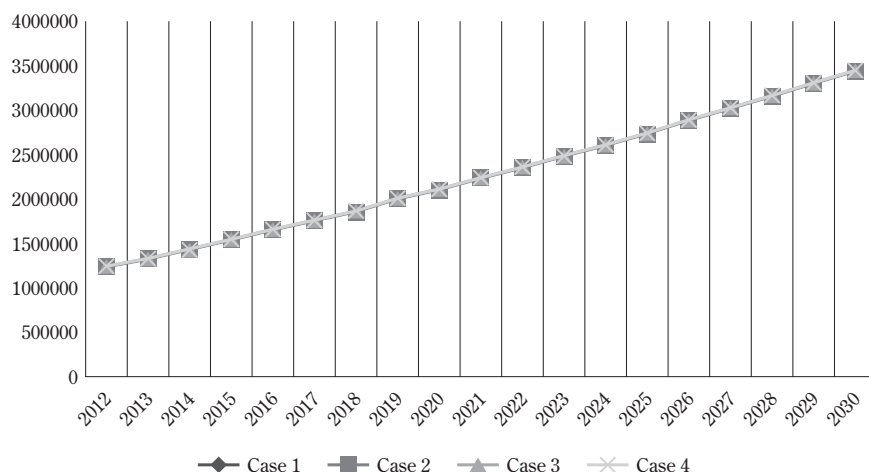


図3 設置コスト 各シナリオの場合の普及経路の比較： $k=0.005$ の場合

表 6 設置コスト 各シナリオの場合の普及経路の比較： $k=0.02$ の場合

年度	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
2012	1224000	1224000	1224000	1224000
2015	1532574	1523541	1533239	1540359
2020	2105709	2088655	2107576	2118925
2025	2746027	2724604	2749223	2760565
2030	3455786	3431171	3460449	3470080
年平均成長率 (%)	5.94	5.89	5.94	5.96

図 4 設置コスト 各シナリオの場合の普及経路の比較： $k=0.02$ の場合

以上のシミュレーション結果は次のようにまとめられる。

(1) FIT 制度の導入により、制度開始時点で設備設置者数は上方にジャンプする。

FIT 制度を導入しなかった場合と制度を導入した 4 つの場合とを比較すると、 $k=0.005$, 0.02 のいずれの場合においても全ての年度において導入件数に 40～50 万件程度の差が認められる。このように FIT 制度の導入による設備の導入件数のジャンプ効果の存在が示唆される。

(2) FIT 制度の固定価格の内容によって、普及経路は大きく変化しない。同様に設置コストの大小が普及経路に与える影響は小さい。

FIT 制度シナリオ Case A～Case D を比較すると、全ての場合について、各時点において導入件数の差は大きくて約 1 万件程度となっている。設置コストシナリオ Case 1～Case 4 を比較した場合も同様である。よって、大きな差は認められない。

(3) FIT 制度の固定価格の内容にかかわらず、普及の成長率はほぼ同じである。同様のことは設置コストについても言える。

このことは表 3～6 から確認できる。

4-4. 考察

以上のようなシミュレーション結果となった要因を考察するために、モデルの (10) 式を再掲する。

$$\dot{n}(t) = kn(t) + \varphi(t)$$

この式に示されているように、新規設置者 (\dot{n}) は既設置者数 ($n(t)$) の影響と、設置コストや FIT 制度の影響 ($\varphi(t)$) を受ける。結果として、シミュレーションでは、前者の影響が強く現れたため、政策の違いが普及経路にほとんど影響しなかったのである。 k がもっと小さければ、政策の違いが現れたと考えられるが、過去の実績をもとに設定されたパラメータからは、シミュレーションで選択された水準、あるいはそれ以上の水準の k が示唆された。なお、 $k=0.005, 0.02$ それぞれの場合の導入件数を比較すると、 $k=0.02$ のほうがその成長率は高く、2030 年時点の導入件数は最大で約 55 万件の差が認められる。

第 1 節で考察した日本で起こりえる問題として、再生可能エネルギーの急激な導入量増加による再生可能エネルギー賦課金を通じての電気料金の急激な上昇というものがあった。これを防ぐには、FIT 制度の固定価格を調整するのではなく、FIT 制度導入後の大幅な買取価格改定などの大きな内容変更を行わないことが必要と考えられる。例えばスペインでは、前述の通り 2007 年時に固定価格を大幅に引き上げた結果急激な導入を招き、電力会社の赤字拡大につながった。シミュレーション結果が示すように FIT 制度の導入による導入件数のジャンプ効果は、かなりの大きさを持つので、FIT 制度の大幅改定は日本においても電気料金の急激な上昇につながる可能性がある。

5. 要旨と結語

本研究で得られた知見は次のように要約できる。

- (1) FIT 制度の導入に伴って発生する問題に関して、海外 3 地域の事例から推測されることとして、日本で発生しうる問題は電気料金の急激な上昇である。
- (2) マーケティング分野で利用されているモデルを応用し、住宅用太陽光発電の普及経路が、既設置者の数とともに、FIT 制度や設置コストによって影響されるモデルを構築し、その普及経路を推計した。推計の結果、FIT 制度の固定価格に関する内容や設置コストの大小は、普及経路にあまり影響を与えず、むしろ影響は、制度の導入や制度の大幅な変更による、既設置者の短期的増加（ジャンプ効果）として現れることが示唆された。
- (3) したがって、日本において FIT 制度を通じた電気料金の急激な上昇を防ぐために

は、制度自体の大幅改変や固定価格の大幅値上げを行わないことが重要である。

本論文では、マーケティングの分野で用いられるような、新製品の既購入者の数が普及経路に影響を与えるモデルを使用した。その結果、このようなモデルは既設置者数の影響を強く評価するものになった。これとは別の、FIT 制度の内容や設置コストが普及経路に与える影響をより強く評価できるモデルを考案し使用する必要があるかもしれない。異なるモデルを用いて普及経路を予測し、その予測結果を本研究の結果と比較することで、より信頼性の高い議論が可能となると考えられる。このことを今後の課題としたい。

注

- 1) FIT は Feed-In-Tariff の略称である。
- 2) 資源エネルギー庁「ドイツにおける再生可能エネルギーの普及と費用負担について」、日本貿易振興機構「ドイツの電力・エネルギー事情とビジネスチャンス」による。
- 3) 電気事業連合会「4. 再生可能エネルギー導入政策の動向」、荒井・佐野（2014）による。
- 4) ネオマグ株式会社「[太陽光発電] 接続トラブル ハワイ、『見える化』で解決」、日経テクノロジー「スマート化するパワコン、ハワイ州における太陽光発電の大量導入問題を解決」、電気事業連合会「[米国] ハワイアンエレクトリック社が新規ルーフトップ PV 設置者の料金負担を増加させる計画」による。
- 5) 具体的な引き下げは以下の通りである。オアフ島：29.5 円/kWh→18 円/kWh、ハワイ島：35.9 円/kWh→22.5 円/kWh、マウイ島：35.1 円/kWh→23.1 円/kWh。
- 6) スマートジャパン「九州の再生可能エネルギーに急ブレーキ、発電設備の接続を保留する事態に」、太陽光発電協会「JPEA PV OUTLOOK 2030 2030 年に向けた確かな歩み」による。
- 7) 正確には、エネルギー供給高度化法によって、太陽光発電の固定価格買取制度は 2009 年度より先行実施されていた。ただしそれは 10kW 未満の小規模システムを対象に限られていた。
- 8) 「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」第 5 条 1 項 3 号、施行規則第 6 条 5 項・6 項
- 9) モデルは赤尾（2015）による。
- 10) 計量経済ソフト NLogit を利用した。
- 11) なお、推定結果から k が小さくなるにしたがって、FIT 制度が導入されなかった場合の 2012 年度の推定太陽光パネル設置者数 n_0 の値が小さくなり、2011 年度実績値よりも小さくなるという問題が生じる（ $k \leq 0.1$ でこの問題は生じる）。

引用文献

- [1] 赤尾健一（2015）固定価格買取制度と太陽光パネルの普及。 Mimeograph.
- [2] 経済産業省『再生可能エネルギー発電設備の導入状況を公表します』 <http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140617003/20140617003.html>（アクセス 2015/12/9）
- [3] 経済産業省 中国経済産業局『都道府県別住宅用太陽光発電システム普及率（平成 25 年度末）』 http://www.chugoku.meti.go.jp/policy/seisaku/energy/pdf/saiene_net/fukyuritsu.pdf（アクセス 2015/11/28）
- [4] 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』 <http://www.nedo.go.jp/library/nissaryou.html>（アクセス 2015/11/30）
- [5] J. エリアシュバーク・G. L. リリエン 編／森村英典・岡太彬訓・木島正明・守口剛 監訳（1997）『マーケティング・ハンドブック』朝倉書店
- [6] 資源エネルギー庁『欧州の固定価格買取制度について』 http://www.meti.go.jp/committee/chochotsu_kakaku/001_06_00.pdf（アクセス 2015/10/17）

- [7] 資源エネルギー庁『固定価格買取制度』http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/（アクセス 2015/12/8）
- [8] 資源エネルギー庁『再生可能エネルギーを巡る現状と課題』http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/pdf/001_03_00.pdf（アクセス 2015/11/17）
- [9] 資源エネルギー庁『第3節 一次エネルギーの動向』<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/2-1-3.html>（アクセス 2015/11/18）
- [10] 資源エネルギー庁『長期エネルギー需給見通し（案）』http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/010/pdf/010_05.pdf（アクセス 2015/12/7）
- [11] 資源エネルギー庁『ドイツにおける再生可能エネルギーの普及と費用負担について』https://www.jimin.jp/policy/policy_topics/pdf/pdf147_3.pdf（アクセス 2015/10/31）
- [12] 新エネルギー財団『都道府県別 kw 当たりの年間発生電力量と年間売電電力量（10年間）』<http://www.solar.nef.or.jp/josei/h18-07.pdf>（アクセス 2015/11/15）
- [13] スマートジャパン（2014）『九州の再生可能エネルギーに急ブレーキ、発電設備の接続を保留する事態に』<http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1409/25/news037.html>（アクセス 2015/11/20）
- [14] 太陽光発電協会『平成 26 年度 住宅用太陽光発電補助金交付決定件数』http://www.jpea.gr.jp/jpec/data/doc/pdat_h26koufu_20150224.pdf（アクセス 2015/11/15）
- [15] 太陽光発電協会『JPEA PV OUTLOOK 2030 2030 年に向けた確かな歩み』<http://www.jpea.gr.jp/pdf/pvoutlook2015-1.pdf>（アクセス 2015/11/20）
- [16] 電気事業連合会「『米国』 ハワイアンエレクトリック社が新規ルーフトップ PV 設置者の料金負担を増加させる計画」http://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1250316_4115.html（アクセス 2015/11/27）
- [17] 日経テクノロジー「スマート化するパワコン、ハワイ州における太陽光発電の大量導入問題を解決」<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20150220/405145/>（アクセス 2015/11/27）
- [18] 日本貿易振興機構『ドイツの電力・エネルギー事情とビジネスチャンス』https://www.jetro.go.jp/ext_images/jfile/report/07000984/Germany_E_E.pdf（アクセス 2015/11/14）
- [19] ネオマグ株式会社「『太陽光発電』 接続トラブル ハワイ、『見える化』で解決」<http://www.neomag.jp/newstopic/?p=2103>（アクセス 2015/11/27）
- [20] 北海道大学 荒井真一 佐野郁夫（2014）『スペインにおける再生可能エネルギー導入の状況と課題』[http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/54574/1/ES_63\(2\)_29.pdf](http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/54574/1/ES_63(2)_29.pdf)（アクセス 2015/11/15）
- [21] U.S. Energy Information Administration “Average Price (Cents/kilowatthour) by State by Provider, 1990-2014.” https://www.eia.gov/electricity/data/state/avgprice_annual.xls（アクセス 2015/12/1）
- [22] BDEW German Association of Energy and Water Industries “Stromrechnung für Haushalte.” [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/9D1CF269C1282487C1257E22002BC8DD/\\$file/150409%20BDEW%20zum%20Strompreis%20der%20Haushalte%20Anhang.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/9D1CF269C1282487C1257E22002BC8DD/$file/150409%20BDEW%20zum%20Strompreis%20der%20Haushalte%20Anhang.pdf)（アクセス 2015/11/15）
- [23] La Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia（2014）“Información Estadística sobre las Ventas de Energía del Régimen Especial.” <http://www.cnmc.es/es-es/energ%C3%ADa/documentaci%C3%B3n/documentoscne/boletinescne/regeinformaci%C3%B3nestad%C3%ADsticassobrelasventasdeenerg%C3%ADadelr%C3%A9gimenespecial.aspx>（アクセス 2015/11/28）
- [24] IEA STATISTICS（2006）“Fourth Quarter 2006,” Energy Prices & Taxes, Volume 2006 Issue4. http://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-prices-and-taxes/volume-2006/issue4_energy_tax-v20064-en（アクセス 2015/11/30）
- [25] International Renewable Energy Council（2009-2014）“U.S. Solar Market Trends Reports, 2008-2013 editions.” <http://www.irecusa.org/annual-u-s-solar-market-trends-report/>（アクセス 2015/11/23）
- [26] Lattin, James M., and John H. Roberts（1988）“Modeling the role of risk-adjusted utility in the diffusion of innovation,” Graduate School of Business, Stanford University.

