

太陽光発電普及過程の計量分析

南部 鶴彦、杉原 弘恭、青木 紀勝

はじめに

太陽光（PV）発電は、家計が電力の節電と売電の経済的利益を追求する行動として把握することができる。CO₂削減とか地球温暖化に寄与するという側面はあくまで経済計算に基づいたPV投資の副産物であって、経済的に引き合わない投資は行われぬ。このことは買い取り制度が2010年に導入される以前において、PV投資は国、あるいは地方自治体の補助金を前提としてなされていたことから明らかである。

本章では経済合理的に行動する家計のPV投資の規模と、それに基づく売電量についてミクロ的なモデルを提示するとともに、このモデルから実証分析のための推定式を導出する。

第1章 計量分析のための理論的枠組—理論的モデルと推定式の導出

1. PVの最適規模の決定

1-1 PV発電による利潤の最大化

PVを設置することで利益をうるためには、まず投下した資本を回収し、その後発生する利益をうるというプロセスが必要である。したがって分析上はN年間にわたる投資の利益の現在価値を最大化するというモデルが考えられる。しかしここではモデルを単純化してN年にわたるPV資本設備費と初期工事費との単年度1年分を単年度の収入と比べて利潤を定義する。ある規模のPVを設置することで得られる発電量を \bar{H} とする。

これはある定格のPV装置が生み出す電力量である。定格をKとして、このKの発電効率を α としよう。すると

$$\bar{H}_i = \alpha_i K_j \quad (1)$$

i とはPVが設置される地点を示すものとする。PVの発電効率 α_i は日射量に依存する。次に j とは、定格の大きさおよび種類を示していて、設置されるPVごとに異なる。 i という立地条件の差異は日本の地形を考えると重要である。日射量は地域によって大きく異なっている。たとえば「県」という単位でとって、県が日本海に接するか太平洋に接するかで大きく日射量は異なる。そこで本来の分析の為に、日射量の分布を反映するようなメッシュによって地域区分をしたデータベースが必要である。

このことは同時に、日本の電力会社は複数の県にまたがって供給を行っているが、電力利用者からすれば同じ電力会社から供給を受けていても、立地条件によってPV投資の収益性が異なることを示している。電力料金は同一電力会社内では家計にとって一律であるが、PVによる節電・

売電の利益は立地条件で異なるからである。したがってPV投資モデルは立地条件の差異を示す日射量を指標として取り入れる必要がある。これが前述の α_i である。

次に投資のコストについては、PV設備単体のコストと設置のための工事費に分けて考える。

まずPV設備の1kw発電量あたりの資本コストを c とする。

次にPV設備設置の工事費を考える。既築の建物にPV設備を設置するには屋根への据え付け工事費以外に、建物の補強や改修などの工事が発生する。この費用は当然PV定格の大きさに依存するとともに、屋根面積や形状などにも依存するであろう。大きな設備を設置するにともなってこの工事費は増大するであろうから、工事費を I とすると。

$$I=I(K), \quad dI/dK>0, \quad d^2I/dK^2>0 \quad (2)$$

と仮定することができる。

したがってPVの設置コスト C は次の2つのものからなると考えられる。

$$C=cK+I \quad (3)$$

ただしこれはPV設備の償却年数で正規化した1年あたりのコストと定義する。

以上の準備によってPV設備への投資がもたらす利潤 π は次のようになる。

$$\begin{aligned} \pi_i &= P_H \alpha_i K_i - C_i \\ &= P_H \alpha_i K_j - cK_j - I_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

i はPVが設置されている地点である。この i は後の計量分析では全国を1kwメッシュで区分した地点として把握される。 j はPV設備の定格の大きさを示している。

この π を最大化するような K を求める (i, j という添字は省略する)。

$$\frac{d\pi}{dK} = 0 \quad \text{より}$$

$$P_H \alpha = c + \frac{dI}{dK} \quad (5)$$

$$= c + MC \quad (6)$$

$$\text{ただし } MC = \frac{dI}{dK}$$

最適なPVの規模 K^* は図1で示される。

$P_H \alpha$ はPV発電の限界収入であり、これが限界費用 ($=c+MC$) と等しいとき利潤は最大となる。 K^* の規模は α の大きさに依存することは図2で示される。日射量が多いすなわち α が大きい地域ではPV発電の限界収入は大に、 α が小さい地域では限界収入は小になるので、 K^* の大きさもそれに依りて増大または減少する。

α_S は日射量の少ない地域、 α_L は日射量の多い地域とすると、それに対応したPV設備は K_S 、 K_L である。

次に利潤最大化条件と同時に、この投資が収支均衡を満たす条件を求めなければならない。それは

$$\pi = 0$$

から求められる。収支均衡のときの規模を \bar{K} とすると

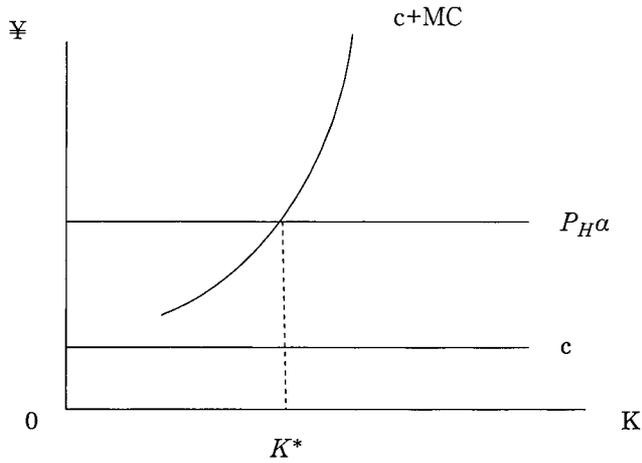


図1

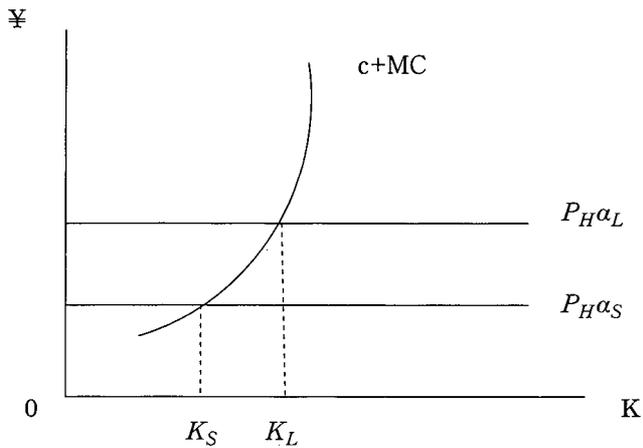


図2

$$\hat{K} = \frac{cK+I}{P_H} \tag{7}$$

利潤最大化条件を満たす K^* はこの \hat{K} を超えていなければならない。

$$K^* \geq \hat{K} \tag{8}$$

最適なPVの規模が同時に収支均衡をもたらすのは $K^* = \hat{K}$ のときである。

K^* と \hat{K} とが一致するケースは次の図3で示される。

平均費用ACは次で定義される。

$$AC = \frac{cK+I}{K}$$

一方、このACの最低点が $P_{H\alpha}$ と一致する点が \hat{K} である。

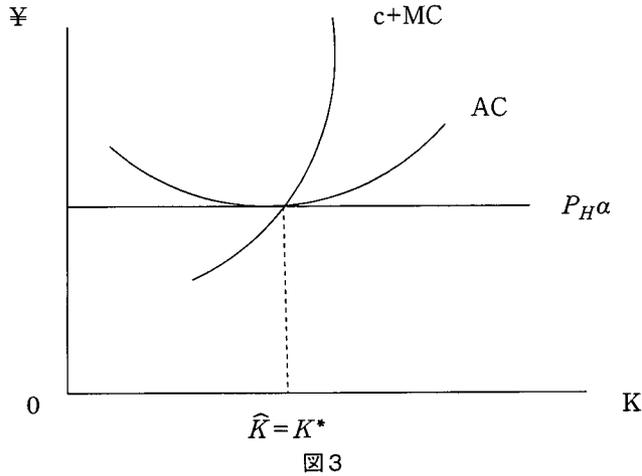


図3

1-2 補助金の効果

買い取り制度の導入がないときPV投資の実現には、補助金を受けなければ収支均衡が達成されないというのが一般的である。そこで次に補助金の存在をモデルに導入する。補助金は国及び地方自治体から出され、その形態は複雑に分かれているが、本質的にPV設備及び工事費への補助という形をとる。そこでここでは単純化のためPV設備工事費の総額に対して補助金が出されるという定式化を行う。

今補助率を $s(0 < s < 1)$ としよう。この s が出されると投資費用は $(1-s)(cK+I)$ となるので、利潤は次の形をとる。

$$\pi = P_H\alpha - (1-s)(cK+I) \quad (9)$$

そこで最適な K^* は次式を満たす。

$$P_H\alpha = (1-s)(c+MC) \quad (10)$$

又は

$$\frac{P_H\alpha}{1-s} = c+MC \quad (11)$$

これを図示したのが次の図4である。

補助金の導入によって限界収入 $P_H\alpha$ は $(1-s)$ だけ上昇する。その結果、限界費用との交点は右方へシフトして K^{**} となる。この K^{**} ではじめて収支均衡がとれるとすると、補助金によって平均費用 AC は最低となる。

$P_H\alpha$ が補助金によって上昇するのは、買取制度の下で買取価格が P_H の k 倍になるのと同じである。すなわち補助金がなく、買取価格が $(1+k)$ 倍になるときは

$$\pi = (1+k)P_H\alpha K - cK - I$$

で利潤最大化は

$$(1+k)P_H\alpha = c + \frac{dI}{dK} \quad (12)$$

買取制度が補助金と同じ効果を持つのは

$$1+k = \frac{1}{1-s} \tag{13}$$

のときである。

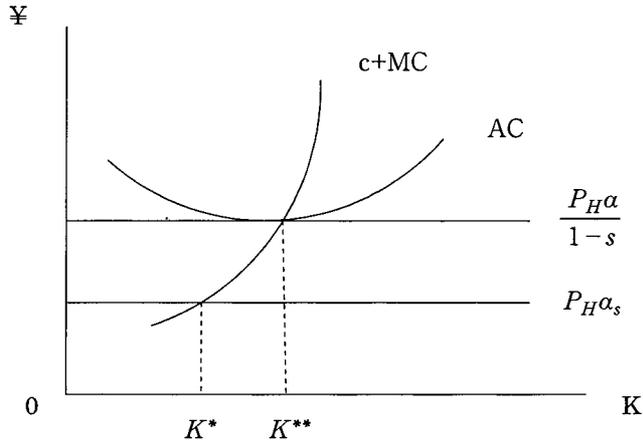


図4

買取価格が k 倍となるだけでなく、総投資費用にも補助が t だけあるときには、次のように最適な水準は大となる。

$$\frac{(1+k)P_H\alpha}{1-t} = c+MC \tag{14}$$

したがって (イ) 補助金のないケース (ロ) 買取のあるケース (ハ) さらに買取制度に補助金が付加されたケースに応じてPVの最適な規模は K^* 、 K^{**} 、 K^{***} となる。

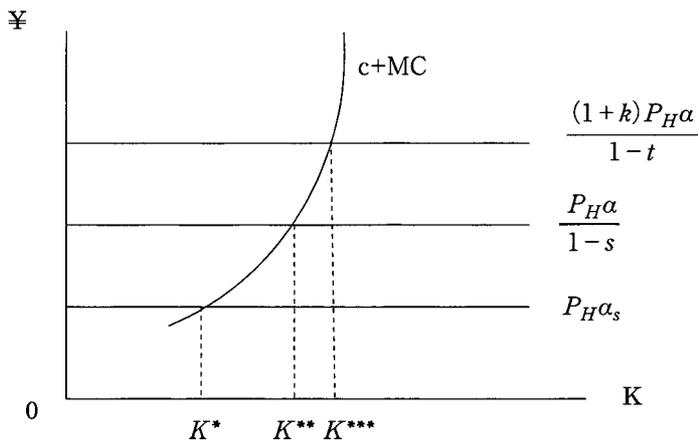


図5

1-3 余剰電力買取制度の導入

これまでのモデルは2007年度までの買取制度が存在しないケースの分析である。次に余剰電力の買取制度が実現した2008年度以降についてモデルを修正してみよう。余剰電力の買取制度ではPVの設置によって家庭用電力消費の節電部分と売電部分とが生まれる。

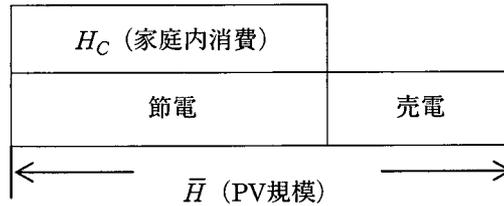


図6

この制度では節電は電灯料金の P_H でなされるが、売電は新たに設定される P_S で可能となる。したがってPV導入の利益は、家庭の必需的な消費 H_C を上まわる発電設備 H を設置するときの利潤 π は

$$\pi = P_H H_C + P_S (H - H_C) - cK - I \quad (15)$$

第1項は節電の利益、第2項は余剰電力を売電するときの利益である。これは次のように書き直せる。

$$\pi = P_S H - (P_S - P_H) H_C - cK - I \quad (16)$$

家計は発電量を全量売却できるときは、まず売却して後に必要なだけ H_C を P_S よりも安い P_H で購入できる。しかしそれは制度として許されないので、必要量 H_C については $(P_S - P_H) H_C$ だけの機会費用が発生している。

H というPV設備を導入するためには aK が必要だから

$$\pi = P_S aK - (P_S - P_H) H_C - cK - I$$

この π を K について最大化すると

$$\frac{d\pi}{dK} = P_S a - c - \frac{dI}{dK} = 0 \quad (17)$$

つまり

$$P_S a = c + MC \quad (18)$$

同時にこのPV投資が収支均衡するためには

$$P_S aK = (P_S - P_H) H_C + cK + I \quad (19)$$

買取制度の導入によって売電価格 P_S と電力価格 P_H の差が生まれる結果、家庭内消費 H_C はコストとして登場する。

買取制度がないときの最適なPV規模と買取制度のあるときとを比較すると次のようになる。

(19)から

$$\text{平均費用} AC = \frac{(P_S - P_H) H_C + cK + I}{K} \quad (20)$$

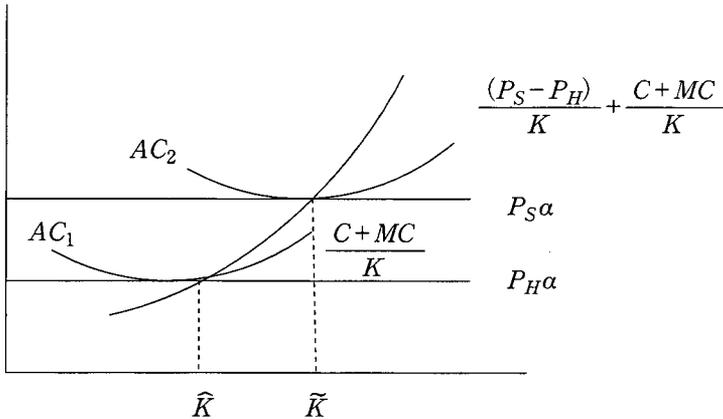


図7

つまり機会費用 $(P_S - P_H)H_C$ 分だけ平均費用は上方へシフトする。この結果、収支均衡点も \hat{K} から \tilde{K} へと増大しなければならない。これが図7である。

ACの位置は余剰買取の機会費用に依存している。そして H_C が大であればあるほど、収支均衡点は大でなければならない。例えば家屋建築面積が大であるとか、家族数が多いというような条件があるほどACは上方へシフトし、 K の水準は大でなければならない。

第2章 ポアソン過程による普及率の分布

1. 確率過程としてのPVの導入

1-1 ポアソン過程の考え方

PVを家計が導入しようとするインセンティブは前節の分析によっていくつかのパラメータに依存することが明らかとなった。次にPVが導入されてゆくプロセスを計量経済学的に分析する枠組みを考えよう。一般的に新しい商品が導入されるときは、短期間に大多数の人々がそれを受け入れ普及率が急に高くなるということは少ない。たとえファッション的な商品でも、それが認知されてから流行になるまでは、一部の人々にしか受け入れられないものである。

PVについて見れば、まず第一にそれを導入するには当初数百万円台の支出が必要であると同時に、それが経済的に有効であると理解する人々は僅かであったと考えられる。又、PVを据えつけるためには新築以外は追加的工事が必要で、家を改修してまでしようとする物好きな人しか導入には踏み切らないだろう。

このような特性から、ある地域例えば市町村などの単位で見ると、PVが屋根の上にある家庭は数百軒かおきにしかなく、非常にまばらにしか分布していなかった。このような分布はPVの認知度が高まったり、CO₂対策としてのエコの感覚が強くなったり、さらに政府によるPV促進策が強化され政府が人々の導入意欲を高めたりすれば、その密度は変化する。

そこでまず当初PVを設置している家庭がごくまばらにしかいない状態を確率分布として記述する。それにはポアソン分布として知られている分布を導くことのできるポアソン過程を用いるのが便利である。

PV導入過程モデルとして次のような確率過程を考える。ある自治体、例えば町単位を考え、そ

ここに存在する家計について0からnまでの家屋番号を付すことにしよう。そして各家計がPVを1基設置しているか否かを調査する。PVを2基設置することは家計ではありえないのでPVの台数は0か1をとる。次の表1は一つの例示である。

表1

家屋番号	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	……	S_i	……	S_j	……	S_k	……	S_{n-1}
PV数	0	0	1	0	0	1	……	1	……	0	……	0	……	1

単純化のために家庭は10軒しかないとして、次の数値例を作る。

表2

家屋番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PV数	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1

この例では10軒に対して3台のPVがあるのでその平均は $3/10=0.3$ となる。これはあくまで説明のための数値であり、実際は1万軒に対して100台というような大きさになる。ここで計算される平均値を ν とする。 S_0 から S_{n-1} までの家屋が連続した変数と見なせるとして、次のような仮定を置く。

S_{n-1} の次に来る家屋 S_n は S_{n-1} から ΔS （つまり一軒）だけ限界的に増加したものである。この限界増加分の一軒がPVを設置する確率は、 S_0 から S_{n-1} までにPVが設置されていた平均値に比例すると考えるのは直観的に納得的である。そこで ΔS という家屋がPVを持つ確率（PVを設置するという事象が生起する確率）を

$$\nu \Delta S (\Delta S = 1)$$

と表示する。そしてこの確率でPVを設置するという事象は最大で1回しか起こらないとする。

さらに家屋と家屋との間にはデモンストレーション効果は働かないと仮定する。例えばかつてのテレビなどはこのような効果があったと考えられるが、PVについてはそのような効果は無視できるとするのである。つまり各家計がPVを導入するか否かは相互に独立であり、系列相関はないものとする。

家屋番号を付して S_0 から S_{n-1} さらに ΔS を加え S_n までPVの有無を調査してゆくという作業は連続した一つのプロセスと見なせる。そのプロセスでPVの有無は確率的に発生するので、確率過程である。

表1、表2で例示したようなある事象がとびとびにしか起らない確率過程をポアソン過程と呼ぶ。そしてこのポアソン過程で次の仮定を置くことによってポアソン分布が求められ、ある事象—このケースではPVが設置されているという事象—が x 件生起する確率を求めることができる。これを言い換えればPVがどの程度まで普及しているかということの一つの指標をうることができる。

1-2 ポアソン分布の導出

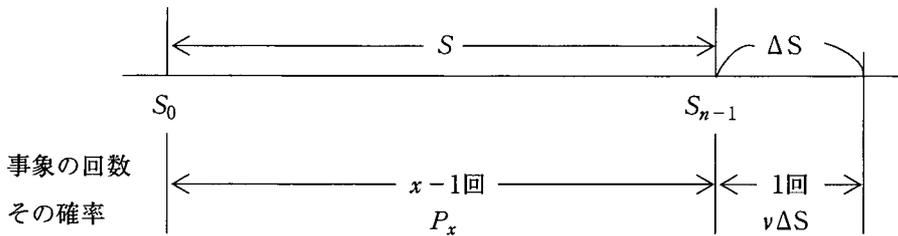
ポアソン過程における仮定

- (1) 各家屋相互即ちあるエリア内にある S_i と隣接する S_{i-1} 又は S_{i+1} の間には相互依存関係はない。つまりある区画の家庭でPVがはやると隣の家庭にこれが伝播することはないと仮定する。
- (2) S_0 から S_{n-1} の次の区画にある限界家計 ΔS がPVを導入する確率は平均値 ν に比例する。
- (3) この事象が生起する回数は最大で1回である。すなわち ΔS ではPVを設置するという事象は起らないか起るとすれば確率 ν で1回のみ起こる。

この(3)の仮定を置くことによって S_0 から S_n までつまり S_0 から S_{n-1} の次の ΔS の区間でPVを設置するという事象が何回起こるのかの確率を計算することができる。 S_0 から S_{n-1} までの区間及び限界 ΔS でPVが設置されているという回数を x とする。

事象が全体として x 回起こるのは次の2つのケースしかない。

ケース1： S_0 から S_{n-1} で間に事象が $(x-1)$ 回あり、次の ΔS で1回起こる。



ケース2： S_0 から S_{n-1} までの間で事象は x 回起こり、次の ΔS では起こらない。

ケース1とケース2とは相互に独立である。

そこで全区間 $S+\Delta S$ で事象が x 回起こる確率 P_x は次のように表現できる。

$$P_x(S+\Delta S) = P_{x-1}\nu\Delta S + P_x(1-\nu\Delta S) \tag{1}$$

事象が1回起こる確率は $\nu\Delta S$ だから1回も起らない確率は $(1-\nu\Delta S)$ である。(1)式の第1項はケース1で S_0 から S_{n-1} で $(x-1)$ 回起こり、 ΔS で1回起こるケースであり、第2項は S_0 から S_{n-1} で x 回起こってしまい、 ΔS では起こらないというケース2を示している。

変形すると

$$\frac{P_x(S+\Delta S) - P_x(S)}{\Delta S} = \nu P_{x-1} - \nu P_x \tag{2}$$

いま $\Delta S \rightarrow 0$ とすれば上式は

$$\frac{dP_x(S)}{dS} = \nu P_{x-1}(S) - \nu P_x(S) \tag{3}$$

この確率微分方程式は P_x を次に置換すれば解くことができる。

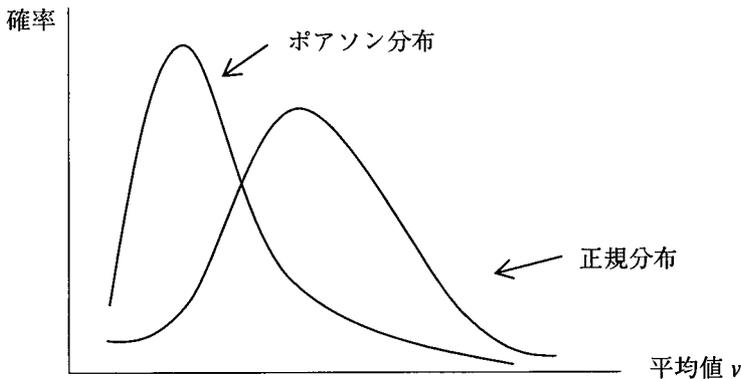
$$P_x(S) = e^{-\nu S} w_x(S) \tag{4}$$

すると解は

$$P_x(S) = \frac{e^{-\nu S} (\nu S)^x}{x!} \quad (5)$$

つまりある事象ここではPVが x 回設置される確率は平均値 ν を確率過程から求められるので、(5)によって計算ができる。

これまで見てきたように、ポアソン過程はかなりの間隔を置いて生起する事象の頻度をとらえるという目的に有効な分析方法である。そして、ポアソン分布は実際に生起した事象の平均値を用いるので、観察されたデータから平均値を求めれば、分布を描くことができる。ポアソン分布は正規分布と比べるとその特徴が明らかとなる。下図のように正規分布は平均値のまわりに均等に分布するのに対し、ポアソン分布は左方へ偏よるという特徴がある。



そして生起する事象の間隔が密になるとポアソン分布は次第に右方へシフトして正規分布に近づく。このような性質があることから、ポアソン分布は普及の程度を示す指標として利用できる。そして分布の形状の特徴として分布の歪みの程度—歪度を指標として使うことが一般的である。歪度 m は

$$m = \frac{1}{\sqrt{\nu}}$$

として定義される。

第3章 住宅用太陽光発電導入に対する補助金効果に関する研究—九電力域内を対象として

1. 研究の背景と目的

太陽光発電（光起電力システムphotovoltaic system、以下、PVという）は、量産効果による低コスト化と技術革新の余地があることから、普及促進政策が採られている。すなわちPVは、on siteの小規模なものから発電所レベルまでニーズに応じた規模を設定できるという利点があるものの、他の発電手段と比較して弱いコスト競争力の問題があり、技術革新による太陽光エネルギーの高効率変換が求められている。PVについては、1970年代オイルショック時に本格的に研究が進められ、1980年代の化石燃料による大気汚染問題、1990年代からの気候変動問題による化石燃料の抑制・削減要請に対応して、実用化がはかられてきている。

本研究は、技術革新を推進すべく、PV産業育成等を目的に実施されてきた住宅用PVに対する過去の補助金の効果を、補助金の途絶えた期間を挟む前後の時期を含めて分析するものである。時系列の都道府県別PV普及率と投資回収を分析したもの〔1〕や、PVの日本列島の日射賦存量から導入ポテンシャルを補助金投入のブレイク・イーブン・コスト分析から求めたもの〔2〕はあるが、9電力管内のPV導入の補助金効果を、PVの普及を時間と共に変化するポアソン分布の過程（Poisson process）として捉え、その歪度を被説明変数として重回帰分析を行った分析は見当たらない。

2. 日本の再生可能エネルギー政策と太陽光発電

日本の再生可能エネルギー、特にPVの技術開発は、通商産業省工業技術院（現（独）産業技術総合研究所）の技術開発政策であるサンシャイン計画（太陽エネルギー技術、地熱エネルギー技術、水素エネルギー技術、石炭液化、1974～1992年度）に始まり、続くムーンライト計画（ヒートポンプ、ガスタービン、燃料電池、超電導技術、1978～1992年度）と、地球環境技術研究開発（人工光合成によるCO₂固定、CO₂分離技術、生分解性化学物質、1989～1993年度）を統合した、「ニューサンシャイン計画」（1993～2000年度）として継続された。同計画では低コスト化を目指すことがうたわれている。2001～2005年度は、太陽光発電システム技術研究開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が中心となって推進された。

また、1980年度からは需要サイド（公共施設、事業施設、住宅）の設備導入政策として、太陽熱利用に関しては「ソーラーシステム普及促進事業」（1/2設備補助と低利融資、1980～1996年度）が導入された。PVに関しては、次のような補助金制度が実施されてきている。

3. PV補助金制度の概要

PVに対する補助金は、国・地方自治体のPV設置導入時の設備投資補助（ストック政策）と、電力会社・国による発電した電力の買い取り（フロー政策）からなる。

国の補助金は、1994～1996年度の「家庭用太陽光発電モニター事業」（定額制）に始まり、1997～1999年度の「住宅用太陽光発電導入基盤整備事業」（価格スライド制）、2000～2001年度の「住宅用太陽光発電導入基盤整備事業」（定額制）と続き、それを引き継ぐように表1に示す2002～2005年度の「住宅用太陽光発電導入促進事業」（定額制）が「トップランナー方式」で行われ、2006年

度～2008年は一旦廃止された。一方、(1)2005年のロシアの批准による京都議定書発効を受けて、「地球温暖化対策推進大綱」(1998年)が、「京都議定書目標達成計画」(目達計画)に格上げされ、化石燃料削減と再生可能エネルギー拡大がうたわれたこと、(2)2006年まで、PV生産量は日本が世界一であったが、ドイツや中国に抜かれたこと、などから、2009年から「住宅用太陽光発電導入支援対策補助事業」として補助金が復活した。

地方自治体の補助金は、国の補助金に併せて1997年頃より徐々に増加してきていたが、2006年度～2008年の国の補助金が廃止されていた間は、地方自治体の補助金がカバーする形となった(図8)。

一方、国の要請を受け、電力会社による太陽光・風力発電からの自主的な余剰電力買取り制度が1992年度から始まった。これは導入されたPVの投資回収を促進すると共に、従来のPVが大容量

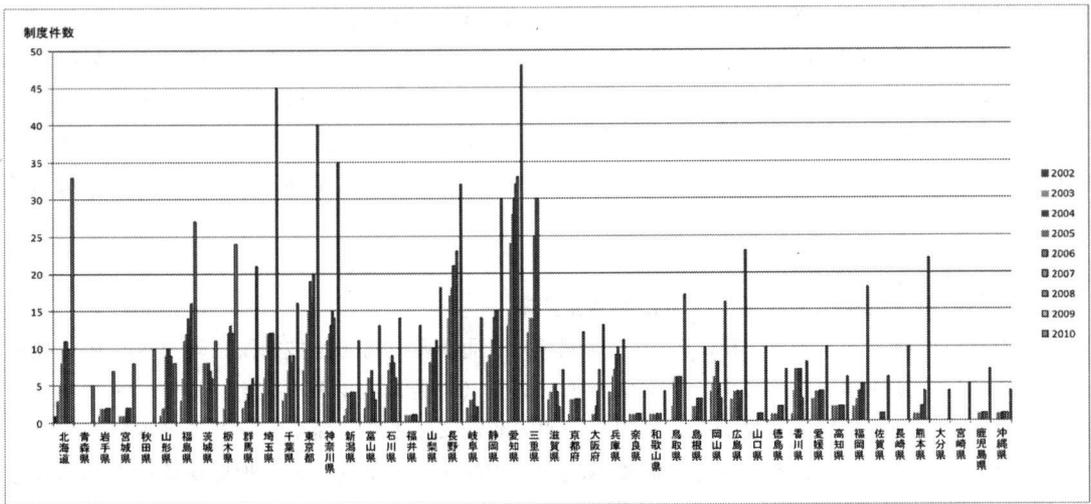


図8 地方自治体の補助制度件数の推移

表3 補助金制度の推移

事業年度	2002(H.14)	2003(H.15)	2004(H.16)	2005(H.17)	2006(H.18)	2007(H.19)	2008(H.20)	2009/1-3	2009(H.21)	2010(H.22)	2011(H.23)	
国の家庭用太陽光発電システム補助	イニシャルコスト(ストック)補助	住宅用太陽光発電導入促進事業(定額制)				なし		住宅用太陽光発電導入支援対策補助事業				
	補助金額(万円/kWh)	上期 12 下期 10	9	4.5	2			7	7	7	4.8	
	上限1	10kW	10kW	10kW	10kW			10kW未満	10kW未満	10kW未満	10kW未満	
	上限2							70万円/kWh(税別)以下のもの	70万円/kWh(税別)以下のもの	65万円/kWh(税別)以下のもの	60万円/kWh(税別)以下のもの	
ランニングコスト(フロー)補助	1992年から始まった電力会社による太陽光・風力発電からの自主的な余剰電力買取りでは、売電料金は月次集計された受給量に、電力各社のブロック料金制度の2段、3段目辺りを買取り価格として計算された。							2009(H.21) (2009/11～)	2010(H.22)	2011(H.23) (2011/4～)		
	住宅用(10kW未満)買取価格(10年間) (ダブル発電・自家発電設備等併設)		48円/kWh (39円/kWh)		48円/kWh (39円/kWh)		42円/kWh (34円/kWh)					
	住宅用(10kW以上)買取価格(10年間) (ダブル発電・自家発電設備等併設)		24円/kWh (20円/kWh)		24円/kWh (20円/kWh)		40円/kWh (32円/kWh)					
	工場・事業所等買取価格(10年間) (ダブル発電・自家発電設備等併設)		24円/kWh (20円/kWh)		24円/kWh (20円/kWh)		40円/kWh* (32円/kWh)					
	住宅用・工場等用とも(500kW以上は電力会社と相対契約で決定)							○		○		
	発電事業目的等是非対象(ただし住宅用は10kW以上非対象)							○		○		

量の鉛電池に蓄電し、そこから交流に変換して過程で使用するシステムであり、PVの実用化にはPVの系統連系による蓄電池部分のコスト削減の意味合いもあった [3]。売電料金は月次集計された受給量に、電力各社のブロック料金制度の2段、3段目辺りを買取り価格として計算された。2009年の補助金復活に併せ、買取り価格が国によって定められ2009年11月より太陽光発電の電力買取制度（住宅用はこれまでの電力会社の自主的な余剰電力買取価格の約2倍の48円/kWh、非住宅は24円/kWh）も導入された（表3）。

4. ポアソン分布と方法・データ

4-1 ポアソン過程

ポアソン過程はまばらにしか生起しない事象を対象としているので、旧買取制度時代のPV導入過程を分析する。この時代にはPVの導入は稀にしか起らなかったからである。理論的背景については第2章で詳述した。

4-2 方法とデータ

重回帰分析を行うに当って、被説明変数は9電力管内ごとの各都道府県の持家戸建て住宅戸数に対する都道府県別PV導入普及件数の比率（管内の各都道府県の持家戸建て住宅戸数ウェイトで加重平均し集計）のポアソン過程（Poisson process）の歪度とする。正規分布からのずれの程度である歪度は $1/\sqrt{m}$ のモメントで示される。 m はその年の電力管内の平均導入件数（ポアソン分布は分散も m ）であり、普及率が高まれば高まるほど歪度は小さくなる。

説明変数としては、9電力管内ごとにまとめた、自治体補助金件数、電力会社料金（2段目料金、2009～2010年度は48円/kWh）、持家戸建ての屋根面積、住宅戸数、国の補助金ダミー、電力会社ダミーを用いる。各変数に対して用いたデータは表4の通りである。

分析期間は、2006～2008年度の国の補助金廃止期間を含む、2002年度から福島原発事故の影響のない2010年度までを対象とする。

表4 データ一覧

変数	出典	備考
都道府県別PV導入件数	(財)新エネルギー財団(NEF)「年度別・都道府県別 住宅用太陽光発電システム導入状況(導入件数)」、(社)太陽光発電協会 太陽光発電普及拡大センター(J-PEC)「住宅用太陽光発電補助金交付決定件数」	2002～2010年度
自治体補助金件数	(財)新エネルギー財団(NEF) 太陽光発電部「PVたより」各号	各号より著者集計。
9電力会社買取り料金	電気事業連合会統計委員会編『電気事業便覧』各年版	各電力会社で料金改定がある場合は期間に応じた加重平均とした。
持家戸建て住宅(新築+既築)屋根面積	国土交通省「住宅着工統計」	新築+既築の持家戸建て住宅の建築面積を屋根面積とみなす。
持家戸建て住宅(新築+既築)戸数	国土交通省「住宅着工統計」、総務省統計局「住宅・土地統計調査」	ストック統計が5年に1度のデータのため、新築着工統計と除却推定値により各年ストック値を計算。

5. PV普及の分析

5-1 ポアソン過程

図9のグラフは、横軸に各年の9電力管内ごとの持家戸建て住宅戸数に対するPV導入普及件数の比率、縦軸にポアソン分布の出現確率を示したもので、各電力会社とも同じスケールに揃えてある。2002年度の頃はPVの導入件数は少なく、地域で見ればまばらにしか設置されていないこ

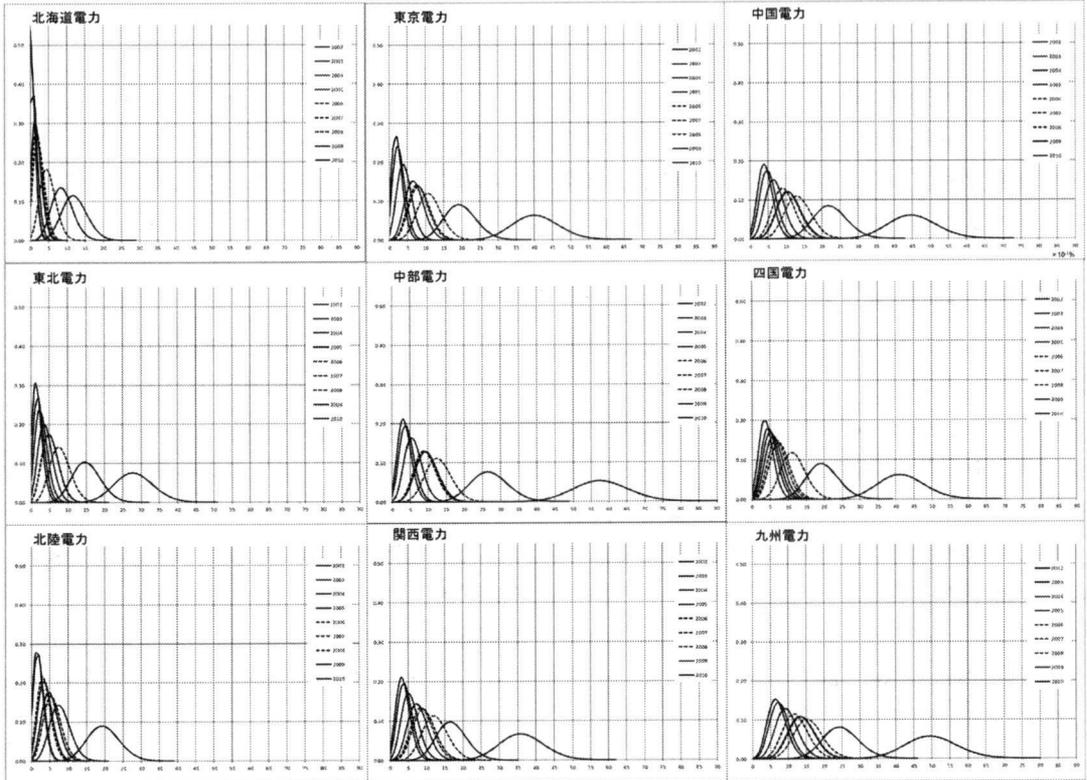


図9 9電力管内のPV導入のポアソン過程

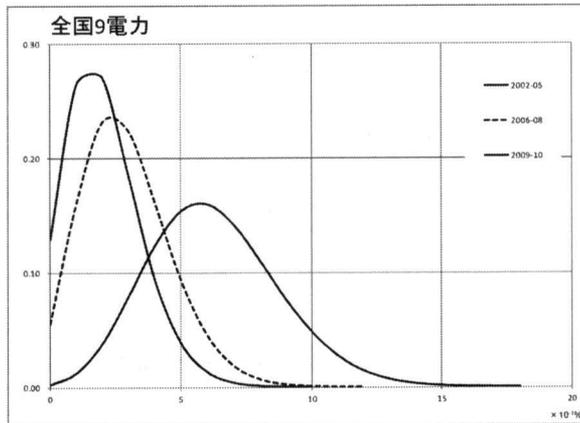


図10 全国・3時期のポアソン過程

とからポアソン分布で近似できる。年を追うごとに件数が増えていくと正規分布に近づくことになる。時系列的な推移でわかることは、国の補助金の途絶えた2006～2008年度には、自治体の補助金は増加していたものの、導入普及率はベースダウンし、国の補助金とそれまでの倍の電力買取り価格が始まった2009～2010年度は急速に正規分布に近づいたことである。2002～2005、2006～2008、2009～2010年度の3時期の平均導入比率を9電力合計で示すとその傾向がより明確になる(図10)。

5-2 回帰分析の結果と考察

2002～2010年度の9電力ごとの持家戸建て住宅戸数に対するPV導入普及件数の比率の歪度($1/\sqrt{m}$)を被説明変数とした対数型回帰分析結果は表4の通りで有意である。説明変数は、各電力会社の買取り料金、屋根面積、住宅戸数、自治体補助金件数に加え、補助金の途絶えた2006～2008年度の国ダミー、電力会社ダミーである。前節においてPVの普及を時間と共に変化するポアソン過程としてとらえたが、普及と共に歪度が小さくなる過程が回帰分析結果としても有意であることは、国・自治体の設備投資補助(ストック政策)と電力会社・国による発電した電力の買取り(フロー政策)とにより、PVの普及促進策は有効に進められたといえよう。

表4 分析結果

説明変数名	偏回帰係数	t値	R ²	DW
LN(自治体補助金件数)	-3.77	2.69		
LN(2段料金&¥48)	2.42	0.92		
LN(新+既築1住宅当り床面積[m ²])	-510.70	3.13		
LN(新+既築戸数)	-103.41	2.70		
国ダミー-2006	3.40	2.55		
国ダミー-2007	7.94	5.12		
国ダミー-2008	6.93	3.88		
東北Dummy	205.82	3.44		
東京Dummy	134.51	2.00		
中部Dummy	172.28	3.19		
北陸Dummy	129.00	2.30		
関西Dummy	84.86	1.92		
中国Dummy	84.57	2.90		
四国Dummy	3.41	0.31		
九州Dummy	70.86	1.98		
定数項	3923.39	3.67		
			0.93	1.89

第4章 ポアソン過程の利用に関して

1. ポアソン過程の定義とポアソン分布との関係

(ア) ポアソン過程の定義

ある現象の生起(例えばPVの導入など)の間隔 D_1, D_2, \dots が互いに独立で、同一の指数分布をするならば、その計数過程 $N(t)$ 、つまり、時刻 t までに生起した現象の数を記録したものをポアソン過程と言う。

(イ) ポアソン分布との関係

任意の時刻 t において、 $N(t)$ は、ポアソン分布をする。つまり、 $N(t)$ が n 個となる回数は以下の式で表わされる。

$$P\{N(t) = n\} = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (1)$$

なお、このポアソン分布の平均は λt 、分散も λt となる。

なお、 λ は単位時間あたりの生起数を表わす。

また、増分 $N(t+s) - N(t)$ は、平均 λs のポアソン分布をする。

$$P\{N(t+s) - N(t) = n\} = e^{-\lambda s} \frac{(\lambda s)^n}{n!} \quad (2)$$

2. 非斉時ポアソン過程

(ア) 非斉時ポアソン過程の定義

PVの年別導入数 (=PVの導入という現象の単位時間あたりの生起数) などは、年々変化している。つまり(1)式において、 λ は時間の関数となる。このようなポアソン過程を非斉時ポアソン過程という。

(イ) 非斉時ポアソン過程の数学的な取り扱い

非斉時ポアソン過程は、以下の式で定義される平均値関数を定義することで通常のポアソン過程に変換できる。

$$m(t) = \int_0^t \lambda(s) ds \quad (3)$$

ここで、

$$\tau = m(t) \quad (4)$$

となる τ を定義して、新たな計数過程 $M(\tau)$ を次式で定義すると、

$$M(\tau) = N(m^{-1}(\tau) = t) \quad (5)$$

$M(\tau)$ は、生起率が 1 のポアソン過程に従う。

3. 数値的な計算

実際のPVでは、単位時間あたりの導入件数、つまり λ が時間とともに増加していくことから、あるポアソン過程 $N(t)$ に関して、以下のような単位時間あたりの生起数を考慮した。

$$\lambda(t) = \alpha e^{\beta t} \quad (6)$$

これを(3)式に代入すると、

$$m(t) = \int_0^t \lambda(s) ds = \frac{\alpha}{\beta} (e^{\beta t} - 1) = \tau \quad (7)$$

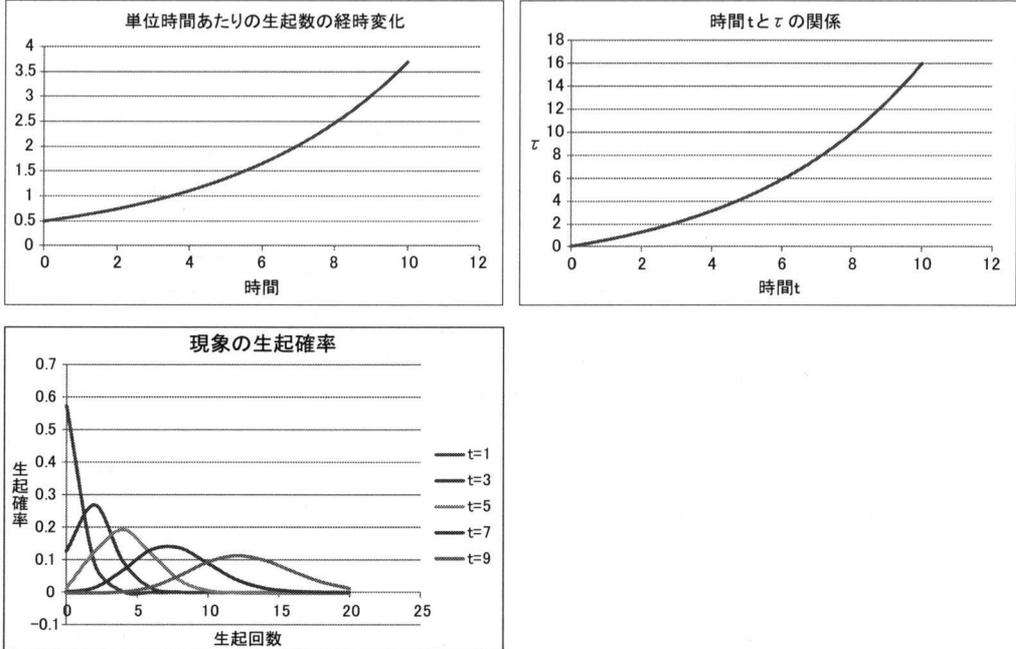
この τ に関する新たな計数過程を(5)式と同じように $M(\tau)$ と定義すると、これは、生起率 1 のポアソン過程であるから、

$$P\{M(\tau) = n\} = e^{-\tau} \frac{\tau^n}{n!} \quad (8)$$

となり、その平均は τ 、分散も τ となる。

(ア) 具体的な計算結果

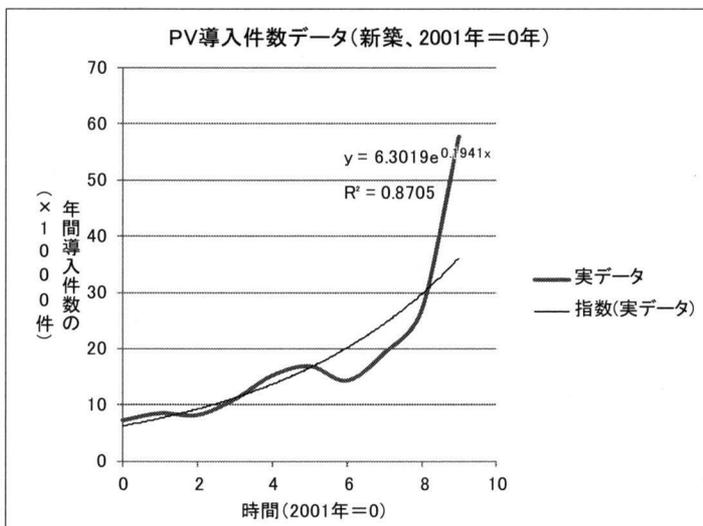
(6)式において、 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.2$ で計算を実施した結果を示す。



(生起回数は隔年までの累積)

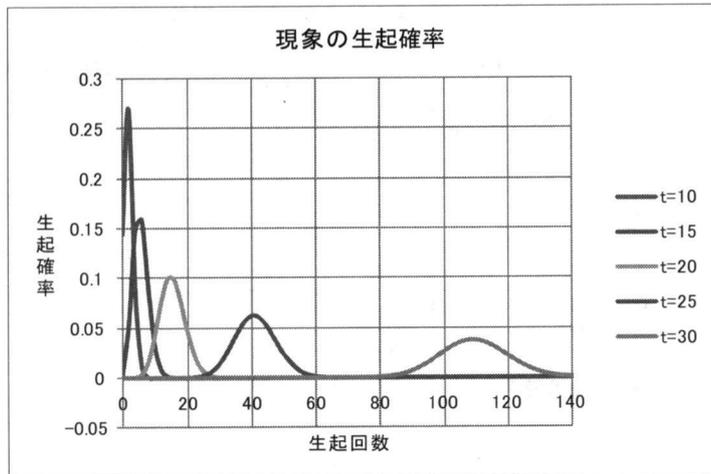
(イ) 実際のPV導入件数データへの適用

PV新築導入件数を(6)式での近似を試みた。



これによれば、2001年以後の導入件数の経時変化は、 $\alpha=6.3019 \times 1000$ 、 $\beta=0.1941$ の(6)式で、R二乗値 0.8705という精度にて近似できる。

このデータから、今後のPVの導入件数を予測してみる。



($t=10$ は2011年、 $t=15$ は2016年、 $t=20$ は2021年、 $t=25$ は2026年、 $t=30$ は2031年)

生起回数は隔年までの累積導入件数を示す、単位は10万件。

この予測結果を整理した表を以下に示す。

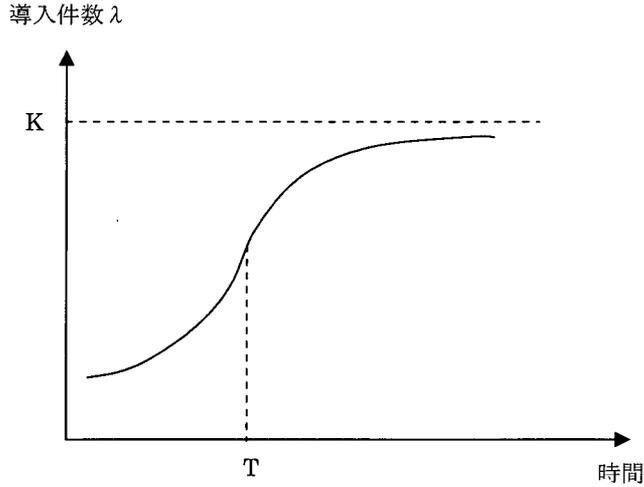
	2001年からの 導入件数平均 (千件)	導入件数の 標準偏差 (千件)	90%値 (正規分布と 仮定した場合)	10%値 (正規分布と 仮定した場合)
2010年 (実績)	186 (実績)			
2011年	194	139	372	15
2016年	564	238	869	260
2021年	1,543	392	2,046	1,040
2026年	4,125	642	4,948	3,302
2031年	10,941	1,046	12,281	9,601

4. 単位時間あたりの導入件数 λ に関する更なる考察

前節では、単位時間あたりの導入件数 λ を(6)式のような増加する指数関数として仮定したが、実際には、導入の増加率はどこかで頭うちとなり以後、緩やかになると仮定すべきであろう。

また、導入件数も新築・改築の総数を超えることがなく、また、日本全体の人口が減少していることから、必ず上限があると言える。

これをグラフとしてモデル化すると、以下のようになると思われる。



これを、以下のような数式でモデル化する。

$$\lambda(t) = \begin{cases} ae^{bt} & (t \leq T) \\ ce^{dt} + K & (t > T) \end{cases} \quad (9)$$

なお、 $b > 0$, $d < 0$ と仮定する。また、 a 、 b 及び K は、現在までのデータから既知とし、 T はシミュレーションにより変更できるとする。

時刻 T におけるスムーズペースティング条件（ λ の値と、ここでの微分係数が等しい）から、以下の方程式が成り立つ。

$$\begin{cases} ae^{bT} = ce^{dT} + K \\ abe^{bT} = cde^{dT} \end{cases} \quad (10)$$

これを解くと

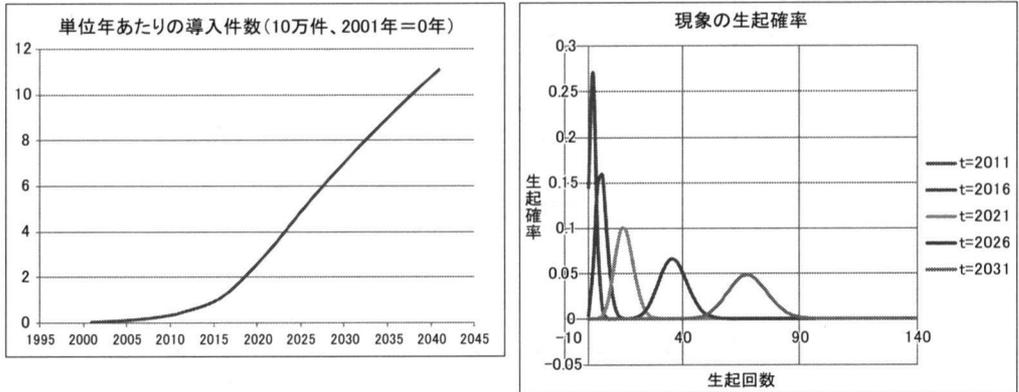
$$\begin{cases} d = \frac{abe^{bT}}{ae^{bT} - K} \\ c = (ae^{bT} - K)e^{-dT} \end{cases} \quad (11)$$

また、平均値関数は以下のようになる

$$m(t) = \int_0^t \lambda(s) ds = \begin{cases} \frac{a}{b}(e^{bt} - 1) & t \leq T \\ \frac{a}{b}(e^{bT} - 1) + \frac{c}{d}(e^{dt} - e^{dT}) + K(t - T) & t > T \end{cases} \quad (12)$$

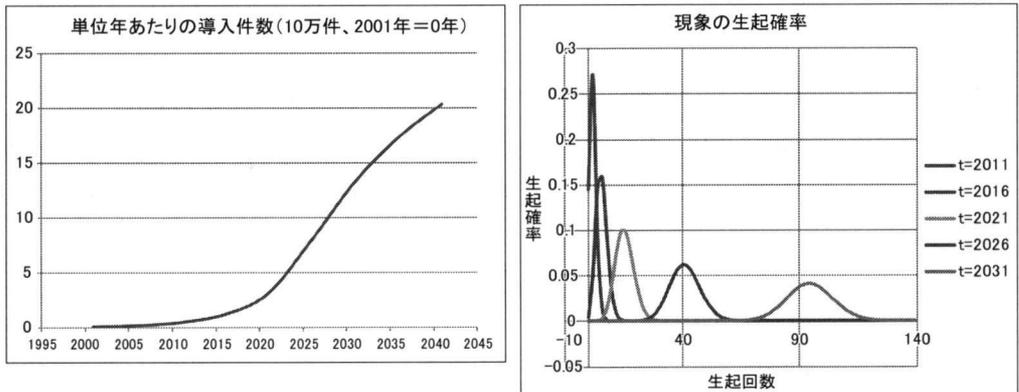
(ア) 数値計算結果

①最大の導入件数Kを300万件（2010年度は5.7万件）、2020年に成長率が鈍化に転じるとする。



2031年までの累積導入件数は、681万件、90%値は787万件、10%値は575万件となる。

②最大の導入件数Kを300万件（2010年度は5.7万件）、2025年に成長率が鈍化に転じるとする。



2031年までの累積導入件数は、947万件、90%値は1071万件、10%値は822万件となる。

このように、成長の鈍化する年が少しずれただけでも、2031年までの累積導入件数の値は大きくずれることがわかった。すなわち経験曲線に基づくコスト予測にも大きなリスクがある。

5. 累積導入件数の分布からコスト分布の類推

(ア) 基本的な考え方

コスト等検証委員会報告書20ページによれば、学習効果による低コスト化シナリオでは、累積生産量が倍増すれば、コストが20%低下するという推計手法に基づいている。ここではこの考え方に従う。

(イ) 学習効果の数式化

ある時点での累積生産量を X_0 、コストを Y_0 とすると、学習効果の基本的な考え方より、累積

生産量が $X=a^n X_0$ の時、コスト $Y=b^n Y_0$ となる。これらの式から、 n を消去すると、 X と Y の関係は以下ようになる。なお、生産量の分布は、 $X<0$ の領域への影響は無視できると考える。

$$\ln Y = \frac{\ln b}{\ln a} \cdot \ln X + \frac{\ln a \cdot \ln Y_0 - \ln b \cdot \ln X_0}{\ln a} = P \cdot \ln X + Q \tag{13}$$

なお、

$$P = \frac{\ln b}{\ln a}, Q = \frac{\ln a \cdot \ln Y_0 - \ln b \cdot \ln X_0}{\ln a} \tag{14}$$

(13)式を整理すると、

$$Y = e^Q \cdot X^P \tag{15}$$

(ウ) コストの平均と標準偏差

累積生産量 X を累積導入件数と考え、その分布は既にポアソン分布として導出されている。その平均と標準偏差を μX 、 σX とし、さらに正規分布であると仮定して、(15)式からコスト Y の平均と分散を考える。

以下では数値シミュレーションによって動きをみる。

(エ) 計算結果

4. (ア)②のケースで、コストの平均と標準偏差を計算した結果を示す。

	コストの 平均値	コストの 標準偏差	90%値 (正規分布と 仮定した場合)	10%値 (正規分布と 仮定した場合)
2010年 (実績)	100 (仮定)			
2011年	95	55	165	24
2016年	69	18	92	46
2021年	48	4.5	54	43
2026年	39	1.8	37	33
2031年	27	0.9	28	25

(15)式でコスト Y は、 X の -0.3 乗に比例するため、年を追うごとに偏差値が小さくなる。

参考文献

[1] 遠藤栄一 (2012) 「都道府県データを用いた住宅用太陽電池の普及に関する分析」平成24年電気学会全国大会予稿集、第7分冊、67-68。
 [2] 杉原弘恭・山下潤・生駒依子・秋澤淳・柏木孝夫 (2011) 「メッシュ気候値を用いた全国住宅の太陽光発電のポテンシャルに関する研究」太陽エネルギー37-1、日本太陽エネルギー学会、41-48。
 [3] 桑野幸徳著・日本太陽エネルギー学会編 (2011) 『太陽電池はどのように発明され成長したのか』オーム社、431。