

選好分析による住宅用太陽光発電の普及可能性評価

Preference Analysis on the dissemination of Residential Photovoltaic Power Generation

吉田好邦 ^{*1}
Yoshikuni YOSHIDA

金山真之 ^{*2}
Masayuki KANAYAMA

松橋隆治 ^{*3}
Ryuji MATSUHASHI

Abstract

Since Kyoto Protocol has come into effect, we have to reduce CO₂ emissions by 6% from 1990. CO₂ emissions in Japan, however, have been constantly increasing, particularly from the household sector. We take particular note of residential photovoltaic power generation systems (PV system). We develop a model to estimate the dissemination potential of residential PV system by combining the models of a revealed and a stated preference model. The revealed preference model explains the PV dissemination rate by capability potential of power generation and capacity cost, based on the sales statistics of PV system. The stated preference model explains the PV dissemination rate by the selling price of generated electricity based on the conjoint analysis. By combining both models, we show the effective policy for disseminate PV system. Accepting the selling price 25.5 yen/kWh contributes the accomplishment of dissemination goal of the government. The subsidy for generated power is more effective than that for capacity cost.

キーワード：住宅用太陽光発電、選好、コンジョイント分析、買い取り価格、普及施策

Key words : Residential photovoltaic power generation, Preference, Conjoint analysis, Selling price, Dissemination policy

1. はじめに

京都議定書で日本に課せられた 1990 年比 6% の削減目標に対して、2005 年時点では温室効果ガスは 1990 年比 7.8% の増加であり、現状から 14% の削減を行わなければならない。部門別の排出量を見ると、産業部門が 1990 年比で、ほぼ横ばいの水準を保っているのに対し、運輸・民生部門が大きく排出量を伸ばしている。京都議定書の数値目標達成には、この部門での二酸化炭素排出量削減が必要不可欠であるが、民生部門は規制をかけにくい性格もあり、有効な対策が困難な現状である。

民生部門における二酸化炭素削減を達成するための一手段として、太陽光発電がある。太陽光発電は発電時に二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーである。政府もこれまでその導入には積極的で、補助金制度等の政策を実施し、2010 年度までに 480 万 kW という目

標を掲げ、その導入を進めようとしている。その一方、従来の発電方法に比べ経済性の面で大きく見劣りするため、普及が進んでおらず、このままでは目標の達成は困難な状況にある。しかしながら政府は、住宅用太陽光発電システムは自律的な普及期に入ったとして、新エネルギー財團の住宅用太陽光発電導入促進事業による補助金額を年々減らし、同事業は 2005 年度に終了となった。補助金制度の廃止は、太陽光発電システムの普及に影響が出ることが考えられ、妥当性の検証が必要である。

太陽光発電の経済性に関する研究では、田中ら⁽¹⁾は住宅用太陽光発電の環境負荷と経済性について検討し、石川⁽²⁾は太陽光発電の設備費用と普及の関係を考察している。また梶屋⁽³⁾は学習曲線を用いて普及のモデリングを行っている。しかしながらいずれの研究も、消費者の選好を考慮した普及モデルの検討には踏み込んでいない。本論文では、太陽光発電システムの導入に対する消費者の選好を過去の実績とアンケート調査の両面から分析し、両者を統合することにより太陽光発電の普及のための効果的な施策が何であるかを検討する。

*1 東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授（〒277-8563
千葉県柏市柏の葉5-1-5）email: y-yoshida@k.u-tokyo.ac.jp

*2 東京大学大学院工学系研究科大学院生

*3 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授

（原稿受付：2007年9月10日）

2. 普及率のモデル化と需要予測

2.1 普及率のモデル化

2.1.1 普及率の定義

まず住宅用太陽光発電システムの普及率であるが、「単年普及率（可能ベース）」について、年間設置件数を、(全一戸建数 - 既設住宅数) × 0.6 で除することによって定義し、以下の分析で用いる。なお 0.6 を乗じているのは、日当たり等を考慮した太陽光発電システムが実質的に導入可能な数とするための補正である⁽⁴⁾。設置件数等のデータは、新エネルギー財団の住宅用太陽光発電システム情報データベース⁽⁵⁾を用いた。

2.1.2 説明変数

単年普及率（可能ベース）の説明変数として、初期投資額（設置単価）と潜在発電電力量を採用した。地域によって補助制度が異なるため、初期投資額は地域別に異なる補助金額を割り引いた値を与えていた。潜在発電電力量は、地域別の日射量に、気温の関数としての発電効率を乗じて求めているため、同様に地域差が生じる。

Fig. 1 に単年普及率（可能ベース）と初期投資額の実績値の散布図を示す。プロットは 1997 年から 2003 年までの各都道府県におけるデータを示している。初期投資額が下がると普及率が上昇する傾向が示唆される。初期投資額が 70 万円/kW 程度では、地域による普及率に大きな差がみられる。次に Fig. 2 に単年普及率（可能ベース）と潜在発電電力量の散布図を示す。潜在発電電力量の大きい地域ほど普及率が高くなっている。以上よりこれら 2 つの変数を普及率の説明変数の候補としてモデル化をおこなった。

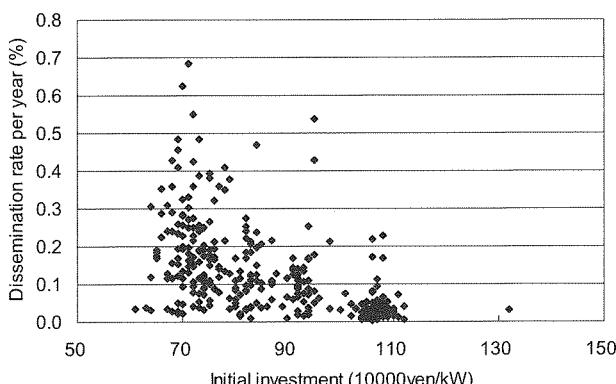


Fig. 1 The relation between initial investment and yearly dissemination rate for each prefecture from 1997 to 2003

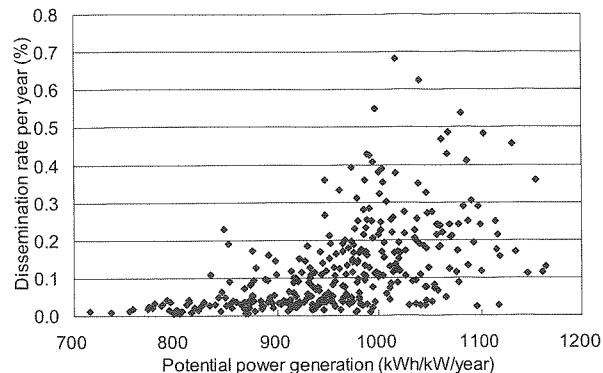


Fig. 2 The relation between potential power generation and yearly dissemination rate for each prefecture from 1997 to 2003

2.1.3 ロジットモデル

単年普及率（可能ベース）を初期投資額と潜在発電電力量によって説明するモデルには、ロジットモデルを用いる。ロジットモデルは、集計されたデータの分析においてしばしば用いられ、消費者の効用最大化行動に基づいた理論体系をもつ⁽⁶⁾。従来数多く適用してきたマーケティング、交通工学の分野以外に、近年では環境評価の分野への適用例も多い⁽⁷⁾。

まず、 W_i を都道府県 i の年間潜在発電電力量 ($\text{kWh}/\text{kW/year}$)、 I_i を都道府県 i での初期投資額 (万円/ kW) とし、太陽光発電システムを導入することにより得られる効用を、

$$f_i = aI_i + bW_i + cD \quad (1)$$

のようく表す (a, b, c は未知パラメータ)。ここで「効用」とは都道府県 i ごとに与えられ、都道府県 i に居住する人が太陽光発電システムを導入することによって得られる満足度の高さを表す指標である。また D は太陽光発電システムを導入するときに 1、しないとき 0 の値をとる都道府県 i によらないダミー変数である。太陽光発電システムを導入しない場合には I_i, W_i, D はいずれも値がゼロで効用値 f_i の値も 0 となる。

さて、都道府県 i における太陽光発電システムの導入確率 P_i は、導入時の効用 f_i に搅乱項 ε_{i1} を加えた値が、非導入時の効用（値は 0）に搅乱項 ε_{i0} を加えた値よりも大きい確率で与えられる。ここで搅乱項 $\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i0}$ は平均が 0 の特定の確率分布に従う確率変数であり、ロジットモデルの搅乱項は、ガンベル分布に従う確率変数であ

る¹。したがって P_i は式(2)のように定式化される。

$$P_i = \Pr(f_i + \varepsilon_{i1} > \varepsilon_{i0}) \quad (2)$$

ε_{i1} と ε_{i0} の従うガンベル分布の分布関数 $F(x)$ が

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \exp(-\exp(-x)) \quad (3)$$

であることを使うと、ロジットモデルにおける選択確率（すなわち太陽光発電システムの導入確率） P_i は若干の計算の後、式(4)のように整理できる。

$$P_i = \frac{\exp(f_i)}{1 + \exp(f_i)} \quad (4)$$

実際に P_i , I_i , W_i に実績値を代入し、最尤法によりパラメータ a, b, c を推定した結果、 $a = -2.74 \times 10^{-2}$, $b = 5.12 \times 10^{-3}$, $c = -9.51$ との推定値を得た。推定値はすべて 5% 水準で統計的に有意であり、モデル式は当てはまりのよさを表す McFadden R-squared 値が 0.21 と実績値と十分な適合度を示した。以上で Fig. 1, Fig. 2 の普及実績を表すモデルを得た。

2.2 需要予測

1998 年と 2003 年の都道府県別戸建て住宅数のデータにもとづいて、戸建て住宅数の年別推移を求めた^{(8), (9)}。既に PV 導入済みの割合を 0.67% とし、導入済み住宅の割合を除いて、0.6 掛けの係数を乗じて設置可能住宅数を年別都道府県別に求めた。

普及率は 2.1 節で推定したモデルを用いて、単年の設置量(kW)を求める。これを年毎に積算して累積の設置量(kW)を求め、次に量産効果による価格低減効果を定式化する。松橋ら⁽¹⁰⁾は、産業連関表を用いて、量産が十分進んだ時点で達成されるであろう、初期投資額を 22.5 万円/kW と算出している。そこで生産量が増大するに従い、価格が 22.5 万円/kW に漸近すると仮定し、回帰分析を行った。今回はデータを直近のものに更新し、新たに回帰式を求めた。以下に回帰式(5)を示す。

$$\ln\{\text{cost}(t) - 22.5\} = 8.98 - 0.398 \times \ln\{\text{prod}(t-1)\} \quad (5)$$

ただし $\text{cost}(t)$ は t 年における価格(万円/kW), $\text{prod}(t)$ は t 年における累積設置量(kW)である。パラメータの推定値は 5% 水準で t 檢定をおこない、いずれも有意であり、決定係数は 0.91 と良好な結果を得た。

なお、本研究で推定の対象は住宅用太陽光発電の設置量であり、式(6)の $\text{prod}(t)$ は、住宅以外を含む国内の全設置量であるため、両者を関係付けるモデルを、1993

¹ 搾乱項によって選択者のきまぐれ要因が考慮され、式(1)の効用の大小関係だけで太陽光発電導入の選択、非選択が決定されるものでは必ずしもないモデル体系となっている。

年から 2003 年までの実績に基づいた回帰分析をおこない、

$$\text{prod}(t) = 1.45 \text{prod}_2(t) + 3.85 \quad (6)$$

の結果を得た。ここで $\text{prod}_2(t)$ は補助金による住宅での設置量であり、 $\text{prod}(t)$, $\text{prod}_2(t)$ ともに単位は万 kW で、決定係数は 0.998 と良好であった。

以上の結果を用いて、需要予測をおこなう。すなわち、普及の拡大と初期投資額の削減の正の循環を考慮したシミュレーションとなる。Fig. 3 にシミュレーションのフローを示す。まずある年の PV 価格のもとでの PV 導入確率が式(4)より求められ、これに設置可能住宅数を乗じて、PV の設置量が得られる。式(6)より住宅以外を含めた全設置量を推定した後、式(5)によって PV 価格が更新される。これを翌年の価格として再び式(4)を適用するという手順である。

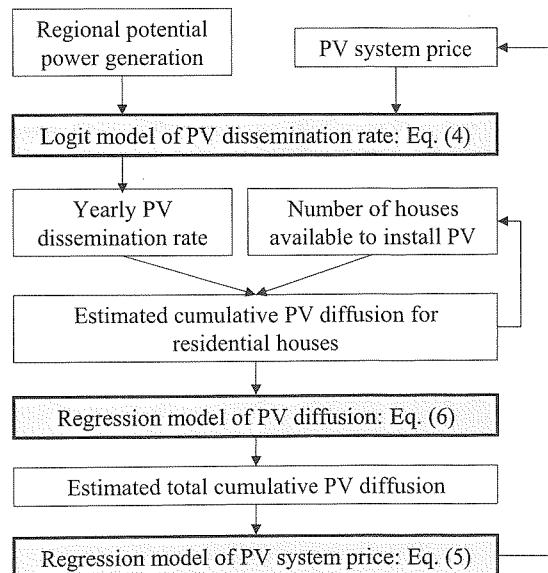


Fig. 3 The Framework of the simulation of PV dissemination

補助金については、2004 年は 4.5 万円/kW, 2005 年は 2 万円/kW の補助金とし、2006 年以降の補助金をシミュレーションにおける操作変数とする。まず、2010 年における政府目標である累積 480 万 kW を達成するための補助金額を計算した結果、26.0 万円/kW との推定値を得た。そこで、2006 年度以降の補助金について、①廃止する、②4.5 万円/kW, ③26.0 万円/kW の 3 つのケースについて検討した。

累積の普及量を予測した結果を Fig. 4、そのときの太陽電池の価格の推移を Fig. 5 に示す。Fig. 4 に示す累積

設置量では、前述のとおり 2010 年の政府目標 480 万 kW を満たすためには、26 万円/kW もの補助金が必要であるが、補助金ゼロの場合でも 2010 年に 305 万 kW の普及と推測され、2004 年における 4.5 万円/kW の補助金を仮に 2006 年以降に継続したと仮定した場合の推定普及量 327 万 kW と比較して、その差は 1 割以下の大きさであり、補助金の廃止は妥当であるといえる。

太陽光発電システムの価格の推移を Fig. 5 でみると補助金の額は違っても、2010 年での推定価格は 40 万円/kW から 45 万円/kW の範囲にある。購入者の初期投資額は、この価格から補助金を差し引いた額のため、各ケースでその値は大きく異なるが、価格自体に大きな差は生じないことが示唆される。

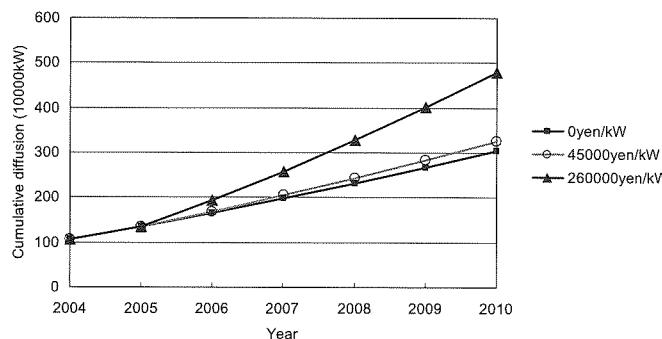


Fig. 4 Estimated cumulative diffusion of PV system under the given subsidy for initial investment

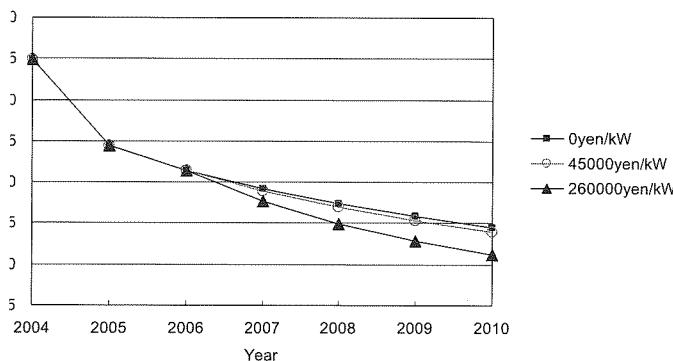


Fig. 5 Estimated price of PV system under the given subsidy for initial investment

3. 消費者選好の調査

3.1 調査概要

消費者の太陽光発電に対する購入行動をより詳細に知るために市場調査をおこなう。太陽光発電の普及には

様々な課題があるが、それらの課題に対し消費者が購入に関してどのような選好を持つかを把握することにより、有効な普及策を提示することが可能となる。本論文では、コンジョイント分析により消費者の選好を分析した。コンジョイント分析は、市場調査の分野で多用され、多属性を同時に評価できることや、市場に存在しない商品の価値を評価できるといった利点があり⁽¹¹⁾、環境評価への適用事例も多い⁽¹²⁾。コンジョイント分析では、複数の属性とその属性を構成する水準によって示されるプロファイルに対する選好を回答者に尋ね、プロファイルと回答結果の関係を統計的に推計し、属性単位の価値（効用）を評価する。基本的にはこのプロファイルを回答者に提示するアンケートの形を取るが、今回は選択型コンジョイントとよばれる複数のプロファイルの中から最も望ましいものを選ぶ形式を利用した。

調査は 2006 年 1 月にインターネットによっておこない、戸建て住宅の所有者ならびに戸建て住宅の購入意思がある人を対象とし、300 の有効回答を得た。

質問の例を表 1 に示す。このように初期投資額と売電価格の組み合わせでプロファイルを構成し、回答者がひとつを選択する。表 1 の形式の質問で回答者ひとりあたり 6 間を課している。なお、本調査では売電価格が変化することによる太陽光発電の普及への影響を探ることを目的としているため、買電価格については現在と同じ水準で固定している。

Table. 1 A question example of conjoint analysis to know the preference for PV system

	Choice 1	Choice 2	Choice 3	Choice 4
Initial investment (10000yen)	300	250	200	Do not choose from Choice 1 to 3
Selling price (yen/kWh)	50	45	30	
Cost payback time (year)	14	13	16	

*Respondents choose a desirable choice from choice 1 to 4

3.2 コンジョイント分析結果

コンジョイント分析の結果を述べる。太陽光発電システム購入の効用 f を初期投資額 I (万円/kW) と売電価格 S (円/kWh) の線形関数として表し、太陽光発電シス

テムの選択・非選択を表すモデルとしてロジットモデルを用いると、回答者の選択結果と最も統計的に適合度の高い効用関数 f として、

$$f = -5.3 \times 10^{-3} I + 5.6 \times 10^{-2} S \quad (7)$$

との推定結果を得た（最尤法による）。パラメータはいずれも 5% 水準の t 検定で十分な統計的な有意性をもち、回答者の選択結果と式(7)のあてはまりの良さを示す McFadden R-squared 値は 0.13 と良好な結果を得た。初期投資額が小さいほど、また売電価格が高いほど満足度を表す効用が高くなるという直感にも整合的な結果が得られた。

3.3 効用関数の統合

コンジョイント分析によって得られた効用関数である式(7)と、過去の実績を分析して得られた効用関数である式(1)は、初期投資額を共通の属性として統合することができる。すなわち式(1)を推定した段階、売電価格の項は現在の値(23 円/kWh)で固定であり、導入確率の地域差には影響を与えない。しかしながら、売電価格が効用関数に影響を与えることは明らかであり、その影響度合いが式(7)によって与えられることになる。初期投資額 I (万円/kW) と売電価格 S (円/kWh)、初期投資額 I (万円/kW) と潜在発電電力量 W (kWh/kW)、切片の係数値の相対的な大きさを保持することにより、統合した効用関数 V は、

$$V = 5.12 \times 10^{-3} W - 2.74 \times 10^{-2} I + 2.87 \times 10^{-1} S - 9.51 \quad (8)$$

となる。導入確率 P は既述のロジットモデルと同様にして次式(10)によって与えられる。

$$P = \frac{\exp(V)}{1 + \exp(V)} \quad (9)$$

式(9)、(10)を用いることで、売電価格の変動が導入シェアに与える影響をシミュレートすることができる。

3.4 売電価格と単年普及率

売電価格の変化が単年普及率（可能ベース）にもたらす影響をシミュレートする。Fig. 6 に示すのは、初期投資額を 70 万円/kW に固定した場合の売電価格と普及率のシミュレーション結果である。例えば、売電価格 23 円/kWh では推定 0.16% 程度の単年普及率（可能ベース）であるが、25 円/kWh では 2 倍弱の 0.29% に上昇し、逆に 18 円/kWh では 1/4 程度の 0.04% に低下する。このように売電価格の普及への感度は比較的高いことが示唆される。

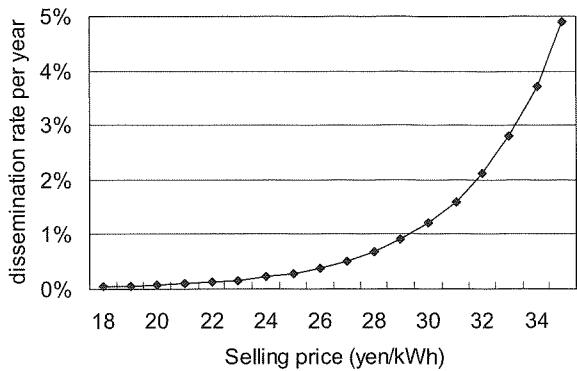


Fig. 6 Estimated relation between selling price of electricity and dissemination rate per year

3.5 普及予測

売電価格に補助費用を出す場合と、初期投資額へ補助を出す場合について普及予測を行った。2004 年をシミュレーションの基点とし、2005 年までは売電価格を 23 円/kWh とし、2006 年以降の売電価格をシミュレーションの操作変数とする。初期投資額を 70 万円/kW に固定し、2010 年度の政府目標 480 万 kW を達成するために必要な売電価格を求めるとき 25.5 円/kWh の値が得られた。なお、この結果は 23 円/kWh の買電価格を前提としたものであり、売電価格は買電価格を 2.5 円/kWh 上回る。

設置費用への補助と売電価格への補助を比較する。売電価格を 25.5 円/kWh とした場合、4.2kW の規模で大阪府の平均日射量を仮定すると年間 4909kWh の発電量となり、初期投資額を 70 万円/kW とすると 23.5 年の単純投資回収年数を得る。売電価格が 23 円/kWh のときにこれと同じ投資回収年数を実現する初期投資額の補助費用を求めると、6.8 万円/kW の値を得た。これらの結果から普及シミュレーションを、(1)BAU ケースとして現状の制度を再現したもの、(2)売電価格を 25.5 万円/kW に増額したケース、(3)初期投資への補助金を 6.8 万円/kW としたケース、の 3 通りについてシミュレーションを実施した。いずれの場合も 2004 年を基点としてシミュレーションを実施し、2006 年以降に上記で想定した売電価格、初期投資への補助金を適用するとした。

Fig. 7 に各ケースの累積普及量の推移、Fig. 8 に初期投資額の推移を示す。Fig. 7 より、同じ投資回収年数であっても売電価格の増額が、初期投資への補助よりも有効であることが示唆される。これは消費者の選好が売電価格をより重視していることによる。2.2 節で述べたよ

うに初期投資への補助によって政府目標を達成するためには 26 万円/kW の補助額が必要であるから、売電価格の効率性の高さが表れた結果といえる。Fig. 8 は価格ではなく補助金を差し引き後の初期投資額であるため、初期投資への補助のケースが最も値が小さくなるが、売電価格への補助を行った場合でも、普及拡大による量産効果で 2010 年において 41 万円/kW 程度まで低下し、売電価格の増加も価格低下へのインセンティブになり得ることが示唆された。現在一部の料金契約で売電価格が約 28 円/kWh となっているものがあるが、売電価格の普及率に与える影響の大きさを考えれば、このような料金契約がより広く普及することは太陽光発電の普及に効果的であるといえる。ただし、本シミュレーションから得られた政府目標達成のための売電価格は、買電価格を 2.5 円/kWh 上回るものであり、発電電力をより高く買い取る政策が今後の更なる普及促進のためには必要となろう。

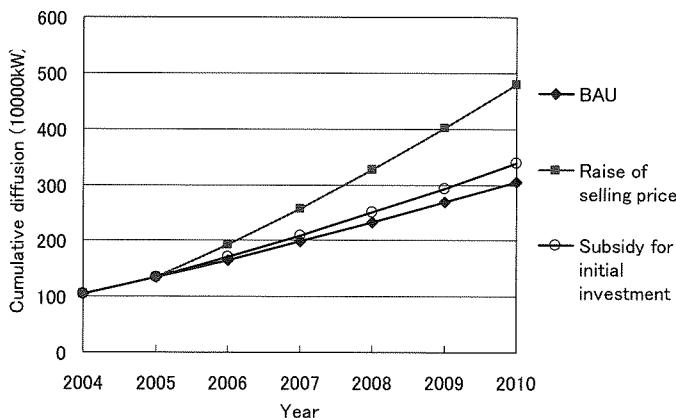


Fig. 7 Estimated cumulative diffusion of PV system under the different scenarios of selling price of electricity and subsidy for initial investment which give the same cost payback time

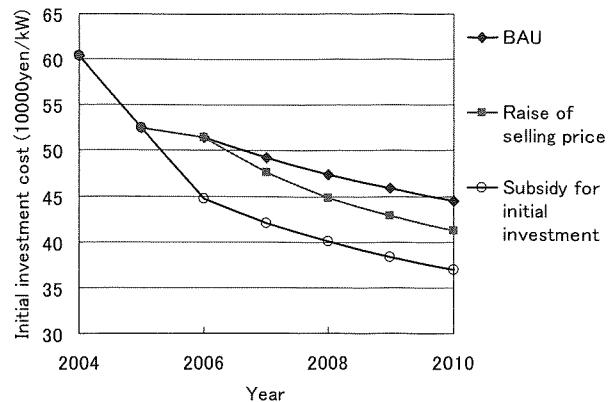


Fig. 8 Estimated initial investment cost of PV system under the different scenarios of selling price of electricity and subsidy for initial investment which give the same cost payback time

4. おわりに

本論文では住宅用太陽光発電システムの導入に対する消費者の選好分析に基づいて、太陽光発電の普及のための有効な施策を検討した。過去の実績とアンケート調査の両面から評価し、住宅用太陽光発電システムの単年普及率（可能ベース）を、初期投資額、売電価格、潜在発電電力量によって説明するモデルを提示した。設置費用への助成金を廃止すると、2010 年度の導入目標は達成困難であると推測されるものの、300 万 kW 程度の普及が見込まれ、4.5 万円/kW の補助金を継続する場合との差は極めて小さく、助成金廃止は妥当であるといえる。

コンジョイント分析に基づいた売電価格のシミュレーション結果からは、2010 年度時点での導入目標を達成するために必要な売電価格を求め、25.5 円/kWh の値を得た。推定した選好モデルによるシミュレーション結果より、消費者の選好は、初期投資額への補助よりも、売電価格を補助の方が大きく、同じ投資回収年数でも普及に大きな差が表れる。普及施策として、電力の買い取り制度を重視していくことが有効であることが示唆された。

謝辞

本研究は、環境省地球環境研究総合推進費 (S-3) によって行われた。ここに関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) 田中昭雄、石原修、酒井孝司、住宅用太陽光発電シス

- ムの経済性と環境負荷評価, 太陽エネルギー,
29-6(2003), 55.
- (2) 石川修, 建築と太陽光発電システムの融合, 太陽エネルギー, 28-6(2002), 2.
- (3) 槙屋治紀, 学習曲線による新エネルギーのコスト分析,
太陽エネルギー, 25-5(1999), 37.
- (4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), 新エネルギー技術開発関係データ集(2001)
- (5) 住宅用太陽光発電システム情報データベース;<http://nef.weathereye.net/index.html>
- (6) 土木学会, 非集計モデルの理論と実際(1995), 12-32, 丸善,
東京
- (7) 吉田好邦, 中塚晋一郎, 松橋隆治, 石谷久, 「車種選好モデルに基づく自動車保有税のグリーン化による CO₂ 排出削減効果の分析」電気学会論文誌 C, 122-5(2002), 868-877
- (8) 平成 10 年住宅・土地統計調査, 総務省統計局(2001)
- (9) 平成 15 年住宅・土地統計調査, 総務省統計局(2006)
- (10) 松橋隆治・石谷久, 設備製造を考慮した太陽光発電システムの普及戦略に関する研究, 電気学会論文誌 B, 121(2001), 899-906
- (11) 大野栄治, 環境経済評価の実務(2000), 105-132, 効草書房, 東京
- (12) 萩島理, 谷本潤, 高園洋行, 戸建住宅の選好における環境性能の影響把握のための基礎的検討, 日本建築学会環境系論文集, 586(2004), 53.