

## 日本の電力市場における固定価格買取制度の評価モデル

学生証番号：086905

氏名：井上 源太

指導教員：茂木源人准教授

### 1 序論

#### 1-1 背景

再生可能エネルギーとは、絶えず補充される自然のプロセス由来のエネルギーのことを指す。枯渇しない、温室効果ガスを排出しないという二つの意味において化石燃料にはない特徴を有し、その導入に一定の意義が認められている。

エネルギーの利用形態として電力に着目すると、発電コストが高く導入が進みにくい再生可能エネルギー由来の電力に対して各国が導入政策を実施している。そのひとつである固定価格買取制度とは、政府が電気事業者に再生可能エネルギー由来の電力を規定の価格で、規定の期間、買い取る事を義務付ける制度のことである。ドイツを初めとしたヨーロッパ各国で電力市場への再生可能エネルギーの大幅な導入に貢献しており、その政策効果が評価されてきている。

我が国においても2009年11月より、経済産業省において固定価格買取制度の検討チームが設置され、今後政府が固定価格買取制度のさらなる拡充を目指していく可能性がある。

#### 1-2 目的

固定価格買取制度は再生可能エネルギー普及に大いに効果があることがヨーロッパ各国の実績とともに明らかにされつつある。一方で、政府の固定買取価格設定が適切でない場合、市場の混乱および、電力の最終需要家である国民に転嫁される負担の過剰な増加などの問題が顕在化している。

今後、我が国において固定価格買取制度を実施する場合に同様の問題を生じさせないためにも、買取価格設定につ

いて十分に調査研究、議論をし、国民が納得できるような将来の価格設定の見通しを定めていかななくてはならない。

我が国においてその買取価格をどのように定めていくべきなのかについての研究調査は現時点では僅少である。よって本研究では、我が国において固定価格買取制度を実施して将来の目標導入量を達成する際に、国民負担を最小とするような毎年の最適固定買取価格を導出することを目的とした(風力発電, 発電事業目的の太陽光発電を対象とする)。

### 2 分析手法

#### 2-1 分析手法の概要

固定価格買取制度において、設定された価格に対する導入電力量を定量化するために、我が国の再生可能エネルギーの限界費用曲線を用いる。よって、まず風力発電と太陽光発電において限界費用曲線を推定する。

次に推定した限界費用曲線を用いて政府が毎年固定買取価格を変化させていく時の時系列モデルを構築する。

最後に、構築した時系列モデルを多段階決定過程問題としてとらえ、動的計画法を用いることによって全期間の国民負担が最小となる毎年の最適固定買取価格を導出する。

#### 2-2 限界費用曲線の推定

##### 2-2-1 固定価格買取制度における導入電力量の定量化

固定価格買取制度において、設定された価格に対する導入電力量を定量化するためには我が国において再生可能エネルギー由来の電力を生産する時の限界費用曲線が必要である。図1は固定価格買取制度における導入量決定を模式的に示したものである。発電事業者は限界費用が固定買取価格  $F$  と等しくなる点  $a$  において利潤を最大化させるこ

とができる。この時に導入される電力量は点 a における取引量  $q$  に決定される。

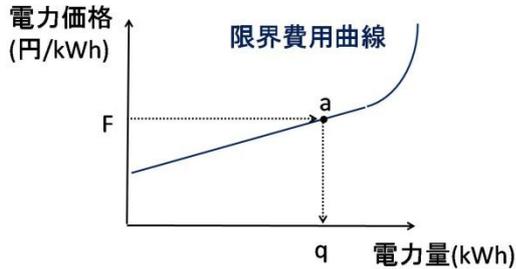


図 1 固定価格買取制度における導入量決定

### 2-2-2 限界費用曲線の推定

限界費用曲線推定に必要な情報は以下の三つである。

- A) 発電設備の建設が可能な地積の量
- B) 各地積に建設される発電設備の容量(kW)とその設備から生産される年間発電量(kWh)
- C) 発電事業を行う際に必要なコスト

A)に関しては、国土数値情報の土地利用三次メッシュより荒地、海浜区分を建設可能面積の対象とした。また、データは全て2km<sup>2</sup>四方の大きさで整備した。

B)は、風力発電に関しては新エネルギー・産業技術総合研究所(NEDO)の全国風況マップの風況データを用いて、A)で整備した各メッシュに風力発電設備を建設したときの正味年間発電量を全て推定した。太陽光発電においては、NEDOの全国日射量平均値データマップより日射量と気温を利用して年間発電量を算出した。

C)のコストは累積導入設備容量に応じて設備の価格が低減する習熟効果を取り入れている。習熟効果の定式化は以下のとおりである。

$$\text{設備コスト} \left( \frac{\text{円}}{\text{kW}} \right) = a \times (\text{累積導入設備容量(kW)})^b \quad (b < 0) \quad \text{式 1}$$

a, b : 定数

風力発電、太陽光発電ともに過去の累積導入設備容量と設備コストのデータより定数 a, b を推定した。

最後に各メッシュごとの発電コストを全て計算し、発電コストの安いメッシュから順番に年間電力量を積み上げ

ることによって限界費用曲線を推定できる。実際に推定した2010年の限界費用曲線は以下のようになった(図2、図3)。

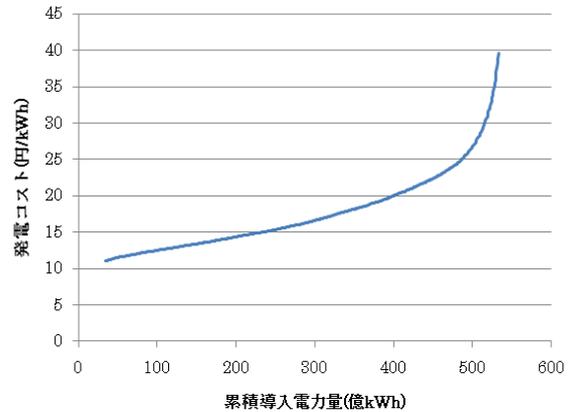


図 2 風力発電の限界費用曲線

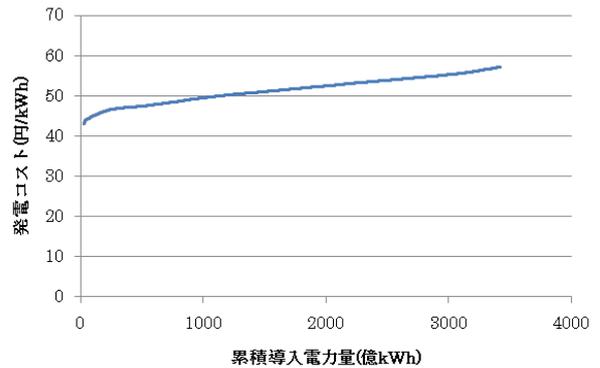


図 3 太陽光発電の限界費用曲線

### 2-3 時系列モデルの構築

推定した限界費用曲線を用いて時系列モデルを構築する。図4は政策実施初年度(0期目)の導入量の決定について模式的に示したものである。

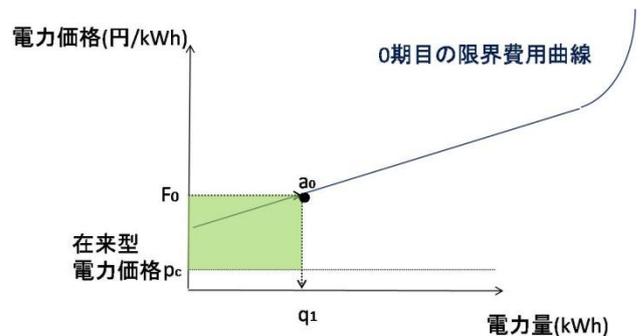


図 4 0期目の導入量決定

0期目に  $F_0$  の価格で固定価格買取制度を実施するものと

すると、電力価格 $F_0$ と限界費用が等しくなる点 $a_0$ で発電事業者は利潤を最大化させる。この時、再生可能エネルギー由来の電力の導入量は $a_0$ の横軸成分である $q_1$ に決定される。また、この年度に国民が払わなければならない負担額 $C_0$ は式2であらわせる(図4の色塗り部分の面積)。

$$C_0 = (F_0 - P_c) \times q_1 \quad \text{式 2}$$

以降、式2で定式化される量を追加国民負担と呼ぶ。

続いて、既導入メッシュの電力量を除外し、習熟効果によるコスト低下を反映させることにより、図5のような1期目の限界費用曲線を導く。政府が固定買取価格 $F_1$ を設定すると0期目と同様に考えて、1期目の導入量 $q_2$ が決まる。

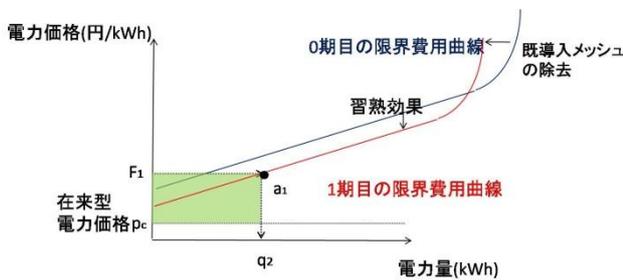


図5 1期目の導入量決定

1期目の追加国民負担も0期目と同様に定量化できる。なお、0期目に導入された設備の電力も1期目に生産されているので、2期目の実負担額は $C_0 + C_1$ となっている点に注意が必要である。以降この額を実負担額と呼ぶ。

以上を繰り返すことによって、固定価格買取制度の毎年の価格設定と毎年の導入電力量、追加国民負担が定量化される。

また、毎期に生じる実負担額を模式的に示したのが図6である。

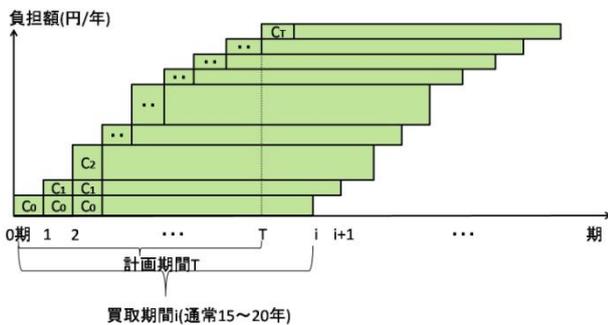


図6 毎期に生じる実負担額の推移

図6の横軸は期、縦軸は毎年の実負担額を示しており、毎年負担額が積み重なっていく様子がわかる。また、買取期間を $i$ とおくと、一度導入された設備から生じる電力は

$i$ 年間買取が続けられ、その結果として負担も $i$ 年間生じ続ける。よって、固定価格制度を実施することによる全期間の実負担額は図6の色塗り部分の面積として視覚化できる。最適な固定買取価格設定においてはこの全期間の実負担額の割引現在価値の合計が最小になっているものとして定義することができる。

## 2-4 最適化[R.Bellman, 1964]

前節で構築した時系列モデルを多段階決定過程問題としてとらえる。動的計画法を用いて式3の最適化問題を解くことにより、固定価格買取制度を行うことによる全期間の国民負担を最小にする最適固定買取価格が導出される。

$$\min_{F_0 \dots F_{T-1}, k_1 \dots k_T} \sum_{t=0}^T C_t \times \frac{1}{(1+r)^t}$$

s.t.  $k_{t+1} - k_t = f(t, F_t, k_t)$   
 $k_0 \leq \dots \leq k_t \leq k_{t+1} \leq \dots \leq k_{T+1}$   
 $0 \leq F_t$

式 3

$k_0 = 0$ (太陽光発電の場合)

$k_0 =$  現在の導入数(風力発電の場合)

$k_{T+1}$ ; 最終到達導入目標(定数)

なお、式中の状態変数 $k_t$ は、 $t$ 年までに既に発電設備が導入されているメッシュの数を示す。 $r$ は割引率、 $T+1$ はシミュレーション最終期を表す。また、以後最小化すべき目的関数を目的関数としての国民負担と呼ぶ。

## 3 シミュレーション (基準ケース)

### 3-1 条件設定

表1は、基準ケースにおける各種条件である。

表1 基準ケースにおける各種条件設定

計画期間	2010年~2018年
対象地域	日本国内の荒地・海浜地
割引率	4%
最終到達導入目標	風力発電: 1000万kW 太陽光発電: 3700万kW
在来型電力価格	10.35円/kWhで一定

対象技術は風力発電と発電事業目的の太陽光発電とする。各種パラメータはNEDOの風力発電導入ガイドブック、太陽光発電導入ガイドブックに従った。

### 3-2 結果

以下、基準ケースにおける結果である。

#### 3-2-1 風力発電

風力発電の最適固定買取価格の推移は図7のようになった。

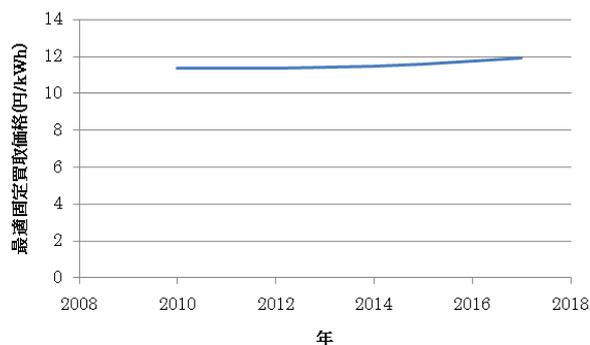


図7 風力発電の最適固定買取価格の推移

最適固定買取価格は、初年度 11.3 円/kWh、2015 年ほどまではほぼ一定の価格を保ち、2016 年に 11.7 円/kWh、最終年度に 11.9 円/kWh と微増した。

最適固定買取価格を実施したときの累積電力導入量は図8のようになった。

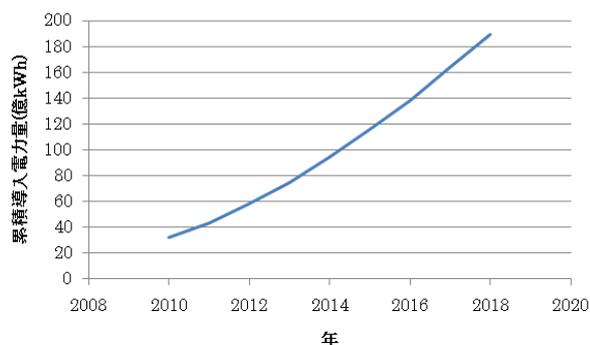


図8 風力発電の累積電力導入量の推移

毎年の電力量は初年度がおおよそ 10 億 kWh、年を経るごとに導入量は増え最終年には 25 億 kWh の導入がなされていた。

#### 3-2-2 太陽光発電

太陽光発電の最適固定買取価格の推移は図9のようになった。

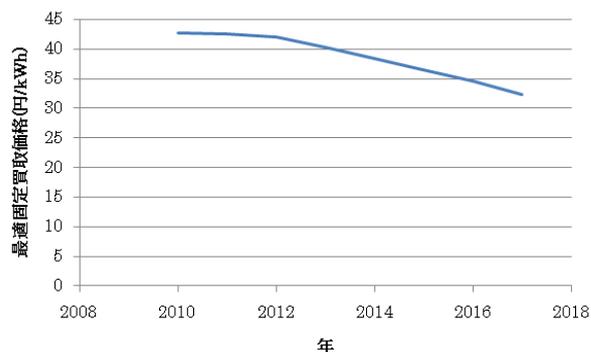


図9 太陽光発電の最適固定買取価格の推移

太陽光発電は固定買取価格を初年度 42.6 円/kWh から最終年度 32.4 円/kWh まで毎年おおよそ 5% ずつ削減していく政策が最適となった。なお、ドイツの 2004 年からの太陽光発電の固定買取価格削減率は毎年 5% 前後であるが、今回はそれに近い値となっている。

最適政策を実行したときの累積導入電力量の推移は図10のようになった。

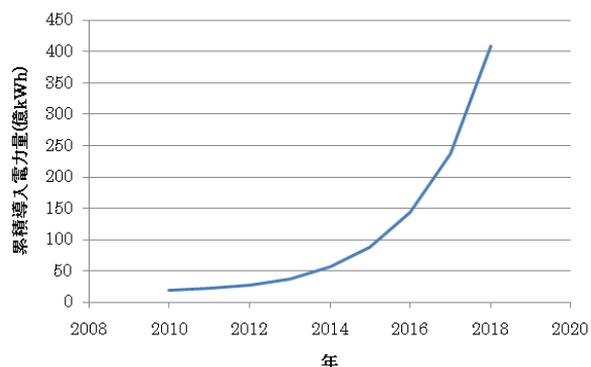


図10 太陽光発電の累積電力導入量の推移

毎年の導入電力量は、初年度 3 億 kWh から、最終年度 173 億 kWh まで大幅に増加する。

## 4 シミュレーション（感応度分析）

### 4-1 感応度分析の分析ケース

習熟効果、割引率、在来型電力価格の三つの外生変数に対して、値が変わった時の最適固定買取価格、目的関数としての国民負担への影響を観察するため、表2のように変数ごとにそれぞれ5つのケースをシミュレーションし、比較した。なお、各外生変数の最大振れ幅は、概ね現実起こりうる振れ幅を推定して設定している。

表 2 感応度分析ケース

	習熟効果	割引率	在来型電力 価格 (円/kWh)
ケース0	0.5倍	0倍	-1
基準ケース	1倍	1倍	一定
ケース1	1.5倍	2倍	+1
ケース2	2倍	3倍	+2
ケース3	2.5倍	4倍	+3
ケース4	3倍	5倍	+4

なお、在来型電力価格においては初年度と最終年度の価格の差を記載している。また、在来型電力価格は毎年一定量で上昇および低下するものとした。

#### 4-2 目的関数としての国民負担への影響

各パラメータを変化させたときの目的関数としての国民負担の変化率(%)を示したものが図11である(左; 太陽光, 右; 風力)。

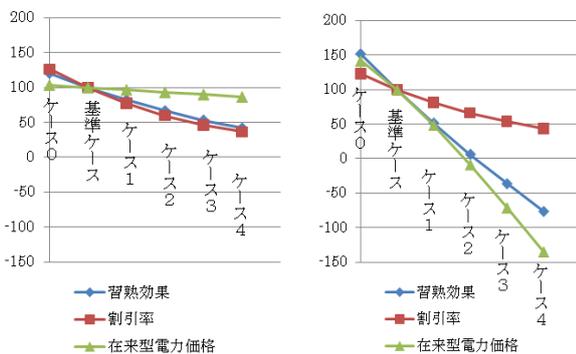


図 11 目的関数としての国民負担への影響

特に風力発電において、習熟効果と在来型電力価格の影響が大きいことが確認された。これは主に風力発電の固定買取価格と在来型電力価格が近いことに起因している。

#### 4-3 最適固定買取価格への影響

各パラメータを変化させたときの最適固定買取価格への影響は習熟効果が大きかった。習熟効果の最適固定買取価格への影響を示したものが図12である(左; 太陽光, 右; 風力)。

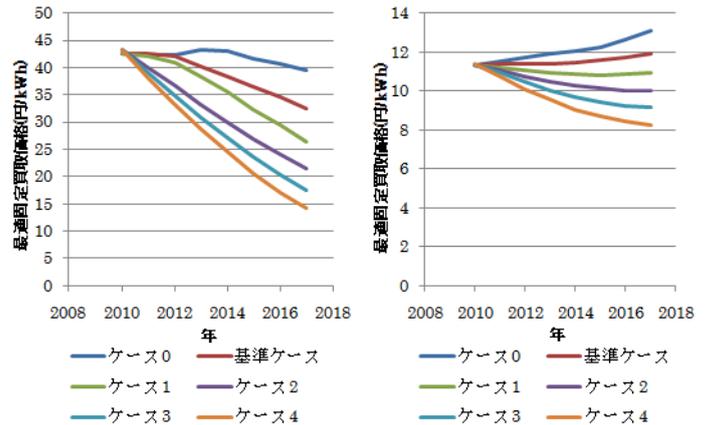


図 12 最適固定買取価格への影響

習熟効果を強くしていくほど毎年の最適固定買取価格の減少率が大きくなっていくことが観察された。

### 5 結論

本研究では、我が国において固定価格買取制度を実施して将来の目標導入量を達成する際に、国民負担を最小とするような毎年の最適固定買取価格を導出することを目的としてきた。

基準ケースの結果は以下ようになった。

風力発電においては、固定買取価格を初年度 11.3 円/kWh から最終年度 11.9 円/kWh まで微増させていく価格設定が、固定価格買取制度を行うことによる全期間の国民負担を最小に抑えることができることが分かった。なお、最適政策を実施した際の毎年の導入電力量は、初年度 10 億 kWh から、最終年度 25 億 kWh まで増加する。

太陽光発電においては、固定買取価格を初年度 42.6 円/kWh から最終年度 32.4 円/kWh まで毎年およそ 5%ずつ削減していく価格設定が、固定価格買取制度を行うことによる全期間の国民負担を最小に抑えることができることが分かった。なお、最適政策を実施した際の毎年の導入電力量は、初年度 3 億 kWh から、最終年度 173 億 kWh まで大幅に増加する。

また、習熟効果による設備価格の低減、割引率、在来型電力価格についてモデルの感応度分析を行った。全期間の国民負担に与える影響は、風力発電における習熟効果、在来型電力価格が強いことが観察された。最適固定買取価格への影響は習熟効果が強いことが分かった。

引用文献

NEDO. (2000). 太陽光発電導入ガイドブック.

NEDO. (2008). 風力発電導入ガイドブック.

R.BellmanR.Kalaba. (1964). Dynamic Programming and modern control theory. Academic Press.