技術習熟に及ぼす研究開発投資の定量分析と、再生可能エネルギーコストの低減効果*

速水 新之介^{*1}, 古林 敬顕^{*2}, 中田 俊彦^{*2}Quantification of technological learning by R&D
and its application for renewable energy technologiesShinnosuke HAYAMIZU, Takaaki FURUBAYASHI and Toshihiko NAKATA^{*2}^{*2} Tohoku University, Graduate School of Engineering
Dept. of Management Science & Technology
6-6-11-815 Aoba-Yama, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

Received 10 August 2013

Abstract

The paper examines the effects of research and development (R&D) on the capital cost reductions and the introduction of renewable energy technologies, namely solar photovoltaics (PV) and wind technologies. The proposed model in the study deals with the dynamics of technological learning. Functional form is a new kind of three-factor learning curve as a function of the cumulative capacity and the knowledge stock accumulated by public and private R&D expenditures. An econometric analysis is used to identify the influence of the knowledge stock on the capital costs of renewable energy technologies. Moreover, the study clarifies the relationship between the cost reductions and the market penetration. If the expenditures for public and private R&D in 2010 are fixed until 2050, then the model predicts that the capital costs of solar PV systems in 2050 become \$1,750 /kW. Sensitivities of the annual R&D growth rate for the technologies are tested. The model also provides important results that the increase by four times of R&D budgets is necessary in order to reach the cost reduction targets by the Japanese government. The proposed methodology herein is helpful for decision makers to forecast how the costs of renewable energy technologies will change, and thereby providing the basis for R&D planning.

Key Words : Technological learning, Research and development, Renewable energy, Econometric analysis, Management engineering, Energy management, Global warming

1. 緒 言

本論文は、研究開発に起因する、再生可能エネルギー技術の習熟効果の定量化を目的とする。技術習熟を考慮しないエネルギーシステムモデルでは、将来の再生可能エネルギー技術の性能を過小評価する可能性がある。そこで、本論文では、技術習熟効果の解析を通して、将来の再生可能エネルギー技術の導入可能性を適切に評価する。また、研究開発への投資効果の定量化を通じて、現在行うべき研究開発投資のあり方を考察する。

エネルギーシステムモデルは、長期的なエネルギー需給や環境影響を考察する上できわめて有用である。特に、電力部門では発電所建設から廃棄までの期間が数十年間の規模であるため、長期的な解析が可能なエネルギーシステムモデルの適用が有効である。現在までに、複数のエネルギーシステムモデルが開発され、将来のエネルギー源構成の予測や最適化が行われてきた (Gritsevskiy, 2000) (Smekerns, 2004) (Nakata, 2001)。しかし、これらの解

* 論文 No.13-00613 [DOI: 10.1299/transjsme.2014tep0042]

^{*1} 東北大学大学院 工学研究科^{*2} 正員, 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-815)

E-mail: nakata@m.tohoku.ac.jp

析では、解析時点でのエネルギー変換技術の性能やコストを用いるため、将来的にコスト低下の余地のある再生可能エネルギー技術の導入量が過小評価される (Rafaj, 2007). そこで、本論文では、研究開発による習熟効果を定量化する技術習熟モデルを構築し、将来の再生可能エネルギー技術の導入コストの変化をモデル化する。技術習熟モデルは、今後の研究開発への投資計画を作成する際の判断材料として役立つ。特に、各国政府は温室効果ガス排出量の削減に向けて再生可能エネルギー技術のコスト削減目標を掲げており、目標達成に必要な研究開発投資予算の算出が可能である。

先行研究で提唱されている技術習熟モデルについて整理する。技術習熟を最も端的に表現したモデルは、一因子習熟モデルである。一因子習熟モデルでは、累積生産量の増加に伴い設備費が低下する。これを一因子習熟曲線と呼び、累積生産量の増加に伴う習熟効果を *Learning by doing* と呼ぶ。一因子習熟モデルは、70 年以上前に提唱されている。Wright は、航空機の累積生産量が 2 倍になると、一定の割合で製造コストが低下することを示した (Wright, 1936)。一因子習熟曲線は、経験的な傾向を定式化したものであり、エネルギー変換技術に対しても応用可能である (Nakicenovic, 1998)。図 1 に、太陽電池モジュール、風力タービン、ガスタービンの一因子習熟曲線を示す。図 1 から、一定割合で設備費が低下する傾向を見て取ることができるが、そのメカニズムはいまだ解明されていない。

近年では、累積生産量だけでなく研究開発が製造コストに及ぼす影響を習熟モデルに組み込んだ解析が行われている。Barreto and Kypreos は、研究開発投資が技術習熟に及ぼす影響をモデル化するために、累積生産量と知識ストックがコスト低下に影響を与えるモデルを提唱した (Barreto and Kypreos, 2004)。これを二因子習熟モデルと呼ぶ。知識ストックとは、研究開発の陳腐化とタイムラグを考慮した累積研究開発費であり、知識ストックの増加に伴う習熟効果を *Learning by searching* と呼ぶ。二因子を考慮することによって、累積生産量の増加による経験の蓄積と、研究開発による知識の蓄積を表現できる。二因子習熟モデルは、様々なエネルギー変換技術に適用可能であり、楠らは、二因子習熟モデルを CO₂ 回収貯留技術、ガスタービンコンバインドサイクル、風力発電、太陽光発電に適用した (楠, 2011)。

習熟解析を用いる際にはいくつかの注意すべき問題点が存在する。Nordhaus は、習熟解析を行う際に、データにバイアスがかかる危険性を指摘した (Nordhaus, 2009)。習熟解析を行う上では、客観的かつ十分な量のデータを用いることが重要である。また、一因子習熟解析における習熟率は、外的要因によって過大評価される危険性を指摘した。これは、習熟因子を増やすことの重要性を意味している。

Fig.1 Learning curves for energy conversion technologies (Nakicenovic, 1998) (IEA, 1998-2010a) (IEA, 1998-2010b)

2. 解析手法

本章では、習熟曲線を設定する。また、解析手順を示し、解析に必要なパラメータとデータを示す。

2・1 習熟曲線の設定

本解析では、二因子習熟モデルを拡張し、三因子習熟モデルを設定する。本解析で用いる説明因子は、民間企業の研究開発による知識ストック、公的研究機関の研究開発による知識ストック、累積生産量の三因子とする。三因子習熟曲線を式 (1) に、知識ストックおよび習熟率の定義を式 (2), (3) に示す。なお、習熟率は累積生産量または知識ストックが 2 倍になった際に、設置単価が下がる割合を表す。

$$P_t = P_0 \cdot \left(\frac{CumQ_t}{CumQ_0} \right)^{-b} \cdot \left(\frac{KS_{Pub,t}}{KS_{Pub,0}} \right)^{-c} \cdot \left(\frac{KS_{Ind,t}}{KS_{Ind,0}} \right)^{-d} \quad (1)$$

$$KS_{i,t} = KS_{i,t-1} (1 - \rho_i) + \frac{RD_{t-l_i}}{def_t} \quad (2)$$

$$LR_j = 1 - 2^{-k} \quad (3)$$

- P_t : t 期におけるエネルギー変換技術の設置単価 [\$/kW]
 P_0 : 初期設置単価 [\$/kW]
 $CumQ_t$: 累積生産量 [kW]
 b, c, d : 習熟係数 [-]
 $KS_{i,t}$: i の研究開発によって蓄積された知識ストック [\$]
 Pub : 大学および公的研究機関
 Ind : 民間企業
 0 : 初期
 ρ_i : 研究開発の陳腐化率 [-]
 l_i : 研究開発のタイムラグ [yr]
 RD : 研究開発費 [\$]
 def_t : 研究開発デフレーター [-]
 LR_j : 累積生産量または研究開発による習熟率 [-]
 k : 累積生産量または研究開発の習熟係数

ここで、研究開発デフレーターは、将来行われる投資額を、基準年の価値に換算する係数を表す。

本解析では、非線形である習熟曲線に重回帰分析を適用し、将来の再生可能エネルギー技術の単価を予測する。研究開発を、民間企業による研究開発と公的研究機関による研究開発に分けた理由は、両者の研究開発の特性が異なるためである。民間企業は応用研究を得意とする一方、公的研究機関は基礎研究を得意とする。これは、公的研究には、普遍性の高い研究成果が求められるからである。このような研究開発の特性の違いから、習熟曲線の説明因子を、累積生産量、民間企業の研究開発、公的研究機関の研究開発の三因子とすることによって、開発から生産までの各段階での技術習熟を網羅的に説明することができる。

2・2 習熟効果の解析手順

太陽光発電技術の習熟効果の解析手順を示す。Watanabe et al.を参考にして、図 2 に示す手順で解析する (Watanabe et al., 2003)。*1 では、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による研究開発プロジェクトと科学研究費助成事業によって知識ストックが増加する。*2 では、民間企業による研究開発によって知識ストックが増加する。*3 では、知識ストックおよび累積生産量の関数である習熟曲線に沿って太陽電池モジュール単価が低下し、*4 では、単価の低下を受けて需要曲線に沿って太陽電池モジュールの出荷量が増加する。本解析での需

要曲線は、式 (4) に示すように両対数型とする。*5 では、生産量の増加によって生産技術が向上し、太陽電池モジュール単価が低下する。また、日本国内の太陽電池産業を解析対象とし、国際貿易および知識のスピルオーバーは考慮しない。

$$Q_t = \alpha \cdot P_t^{\varepsilon_{Q,P}} \quad (4)$$

Q_t : 年間導入量 [kW]
 α : 完全非弾性時の年間導入量 [kW]
 $\varepsilon_{Q,P}$: 太陽電池モジュールに対する需要の価格弾性値 [-]

風力発電技術に関しては世界の風力タービンの技術習熟を解析対象とする。その理由は、日本は外国製の風力タービンの輸入割合が 8 割を超えているためである (経済産業省, 2008)。全世界を解析対象とし、習熟された風力タービンが日本に輸入されることによって、日本国内で流通する風力タービンの単価が低下するモデルを考える。

Fig.2 Cost reduction mechanism for PV technologies

Fig.3 Considerable variables and the research boundary

2・3 解析条件

再生可能エネルギーが大きく普及しない理由として発電コストの高さと出力の不安定性が挙げられるが、本解析では発電コストの高さに焦点を当てる。発電コストに関しては、発電量 kWh あたりのコストではなく発電設備容量 kW あたりのコストで解析を進める。したがって、単価の算出において、設備の寿命や割引率は考慮しない。本解析で考慮するパラメータと考慮しないパラメータを図 3 に示す。

また、太陽光発電システムコストを太陽電池モジュールコスト、システム周辺機器 (Balance of system; BOS) コスト、設置コストの 3 つに分けて解析を行う。この理由は、研究開発の大半が太陽電池モジュールに対する研究開発だからである。風力発電システムコストは、風力タービンコストとその他のコスト (建設費、送電線接続費) に分ける。これも、研究開発の促進によって直接的にコストが低下するのは風力タービンのみだと考えられるからである。図 4 および図 5 に、太陽光発電システムおよび風力発電システムの構成要素に習熟効果が影響を及ぼす物理的な範囲を示す。

本解析で用いたデータは、日本国内での太陽電池出荷量 (太陽光発電協会, 2010)、風力タービン出荷量 (IEA, 1998-2010b) (The Wind Power, 2012)、太陽光発電設置単価 (IEA, 1998-2010a) (新エネルギー導入促進協議会, 2009)、風力発電設置単価 (IEA, 1998-2010b) (Neij, 2003)、NEDO による研究開発費補助予算 (IEA, 2012)、科学技術研究

費補助金予算（日本学術振興会, 2012），民間企業の研究開発費（総務省統計局, 1977-1998）である．太陽電池モジュールの平均単価は，単結晶シリコン型，多結晶シリコン型，薄膜多結晶型，アモルファスシリコン型の太陽電池モジュール単価の重み平均である．研究開発の陳腐化率，タイムラグ等のパラメータを表 1 に，太陽電池と風力タービンに対する需要の価格弾性値，設備の寿命，導入可能量を表 2 に示す．

Fig.4 PV system components and the extent of technological learning

Fig.5 Wind power system components and the extent of technological learning

Table 1 Learning parameters

Learning parameters	Industrial R&D	Public R&D
Depreciation rate ρ^{*1}	20%	10%
Time lag for knowledge effectiveness l^{*2}	3 years	5 years

*1 (Watanabe, 2003) (NEDO, 2008)

*2 (Watanabe, 2003) (Kobos, 2006)

Table 2 Parameters used in the analysis

Parameters	PV	Wind
Price elasticity of demand $\varepsilon_{Q,P}^{*1}$	-5.41	-4.61
Average system lifetime *2	20 years	20 years
Available potential in Japan *3	200 GW	100 GW

*1 (明城, 2009)

*2 (Kobos, 2006)

*3 (環境省, 2011)

3. 解析結果および考察

本章では，太陽光発電技術および風力発電技術に対する習熟効果の解析結果を示す．研究開発費の増減が，両発電技術の設置単価および普及量に及ぼす影響を定量的に示す．

3・1 習熟率の算出と検定

太陽光発電技術に対する習熟率の算出結果を示す。民間企業の研究開発費、公的研究機関の研究開発費、累積生産量の3つの説明変数に対する習熟率はそれぞれ15.7%、13.2%、4.9%と算出された。これは、公的研究機関と比べて民間企業の方が、設置単価に及ぼす影響が大きいことを示す。また、表3から、3つすべての説明変数において p 値が0.01以下であった。このことから、本解析で選択したすべての説明変数が有意水準1%において統計的に有意である。

つづいて、説明変数間の多重共線性を調査するために、各説明変数間の分散拡大係数(VIF)を算出した。表4に、VIFの算出結果を示す。すべての説明変数の組み合わせのVIFが10以下なので、本解析で設定した説明変数は互いに独立である。

以上の検定結果から、本解析で設定した回帰方程式は統計的に有意であり、本解析で行った太陽光発電設置単価の予測結果は統計的に信頼できるものである。

Table 3 The learning rates and the statistics for PV technologies

	Industrial R&D	Public R&D	Cumulative productions
Learning coefficient $-b, -c, -d$	-0.25	-0.20	-0.07
Learning rate LR	15.7%	13.2%	4.9%
t -value	-3.40	-12.16	-6.12
p -value	2.2×10^{-3}	5.4×10^{-12}	2.1×10^{-6}

Table 4 VIF matrix for PV modules

	$\ln KS_{Ind}$	$\ln KS_{Pub}$	$\ln CumQ$
$\ln KS_{Ind}$	-		
$\ln KS_{Pub}$	1.26	-	
$\ln CumQ$	1.70	3.46	-

3・2 太陽光発電設置単価の予測

研究開発費の増減のない場合での太陽光発電設置単価の予測結果を、図6に示す。図から、2050年には太陽光発電設置単価が\$2,600/kW程度まで低下する結果となった。この単価の低下の内訳を見ると、太陽電池モジュール単価が\$3,800/kWから\$1,750/kWへ低下し、BOS単価は\$1,500/kWから\$500/kWに低下し、設置工事費は\$750/kWから\$400/kWへと低下した。つまり、単価の低下幅が最も大きいのは太陽電池モジュールである。太陽電池モジュールの低下幅が大きいことから、2010年時点の研究開発規模を維持することにも一定の効果があることがわかる。また、太陽電池モジュール単価の低下によってBOSの出荷量も増加し、BOS単価の低下が促されることがわかった。図4に示されるように、本研究ではBOSに対する研究開発投資の影響を考慮していないため、BOS単価の低下は累積生産量の増加が原因であると考えられる。

つぎに、予測結果の妥当性について考察する。本解析では、2010年時点で\$3,800/kWであった太陽電池モジュール単価が、2050年には\$1,750/kWへと約55%低下する予測結果となった。Nemetは、米国で流通する太陽電池モジュールについて解析を行い、2050年の太陽電池モジュール単価は2000年比で約70%低下すると算出した(Nemet 2006)。また、EPIAは、欧州における太陽光発電システム単価が2050年には2010年比で約75%低下すると予測している(EPIA, 2011)。両者ともに対象地域や対象期間は異なるが、本解析の低下割合はNemet及びEPIAの算出結果と大きな相違はない。したがって、本解析の予測結果は妥当であると判断できる。

Fig.6 Predicted capital costs of PV system components

3・3 研究開発費の増減率による感度分析

研究開発費の増減が太陽光発電設置単価に及ぼす影響を評価するために、年間の研究開発費増減率について感度分析を行う。増減率は、-5%から+5%まで変化させる。また、研究開発費の増減は、民間企業と公的研究機関の研究開発費が同時に増減するものと仮定する。図7に、年間の研究開発費増減率別の太陽電池モジュールの習熟曲線を、両対数グラフ上に示す。図7から、習熟率は研究開発の投資計画に大きく依存する。また、図8に、年間の研究開発費増減率別による太陽光発電設置単価の予測を、縦軸を対数軸、横軸を時系列で示す。図8から、年率5%で研究開発費を増加させることによって、2050年には太陽光発電設置単価が\$1,400/kW程度まで低下すると予測された。一方、研究開発費を年率5%で減少させると、\$3,900/kW程度までしか単価が低下しない。この結果から、研究開発費の増減は、2050年時点での太陽光発電設置単価に大きく影響を及ぼすことがわかる。

また、図8中の白点は経済産業省(METI)が提唱したコスト目標、黒点は米国エネルギー省(DOE)が掲げたコスト目標をそれぞれ表す(NEDO, 2009)(DOE, 2011)。図8から、年率5%で研究開発費を増加させたとしても、METIおよびDOEのコスト目標を達成することはできない。この理由は、研究開発投資が行われてから実際に単価が低下するまでのタイムラグの存在に加えて、2010年から2020年までの10年間で研究開発投資が少ないためと考えられる。したがって、日米両政府の目標達成には、2011年以降の早い段階での研究開発投資の増額が必要であるといえる。ただし、本研究では研究開発投資の直接的効果のみを考慮している。研究開発に伴う他部門の技術習熟等、間接的效果を考慮した場合には、同じ投資額でも長期間行うことによって、コストがさらに低減する可能性があると考えられる。

Fig.7 Learning curves for PV modules

Fig.8 Predicted capital costs of PV systems, annual R&D growth rate varied

3・4 風力発電設置単価の予測

本モデルを風力発電技術に応用して、風力発電設置単価の予測を行う。太陽光発電技術に関しては日本国内を解析対象としたが、風力発電技術に関しては世界の風力タービンの技術習熟を解析対象とする。この理由は、日本は外国製の風力タービンの輸入割合が8割を超えているためである(経済産業省, 2008)。全世界において研究開発費の増減がない場合の風力発電設置単価を、図9に示す。図から、2010年時点では\$1,450/kWであった世界平均の風力発電設置単価が、2030年には約\$850/kWまで約40%低下する結果となった。文献値と比較すると、EWEAは2030年に2008年比で約37%低下するという予測を行っており(EWEA, 2009)、低下率は本解析の結果とほぼ一致している。したがって、本解析の結果は妥当であるといえる。また、風力発電設置単価の低下に大きく寄与しているのは、風力タービンおよびタワーの単価の低下である。図10に、年間の研究開発費増減率別による風力発電設置単価の予測を示す。研究開発費を年率5%減少させた場合、2050年に約\$800/kWまで設置単価が低下し、収束する。研究開発費を年率5%増加させた場合では、2050年に約\$500/kWまで低下する。

Fig.9 Predicted capital costs of wind system components

Fig.10 Capital costs of PV and wind systems, annual R&D growth rate varied.

3・5 太陽光発電および風力発電の普及量の予測

設置単価の低下による太陽光発電および風力発電の普及量の変化をモデル化した。図11に、研究開発費の増減率ごとの太陽光発電普及量の予測結果を、縦軸を対数軸で示す。図11から、研究開発費の増減のない場合の太陽光発電導入量は、2030年に約4,000万kW、2050年には太陽光発電の導入可能量である約2億kW(環境省, 2011)まで増加する結果となった。また、研究開発費を毎年5%ずつ減少させるケースでは、2050年でも約7,000万kWまでしか増加しない。一方、研究開発費を毎年5%ずつ増加させると、2037年に導入可能量に達する結果となった。この結果から、研究開発費の増減は、太陽光発電設置単価だけでなく、太陽光発電普及量にも影響を及ぼすことがわかる。

つぎに、研究開発費の増減が風力発電の普及量に及ぼす影響について述べる。世界の研究開発費を年率5%, 0%, -5%ずつ増減させた場合の、日本における風力発電の普及量を図12に示す。研究開発費の増減のない場合では2050年に約2,700万kWまで風力発電が普及する。また、研究開発費を年率5%で増加させた場合、普及量は約8,500万kWとなり、日本の風力発電の導入可能量である1億kW(環境省, 2011)と同水準まで普及する。

太陽光発電および風力発電の普及量の予測を行ったが、本解析における普及量の予測モデルは、普及量に影響を与える要因を十分に考慮できていないという問題点がある。本解析では、式(4)に示すように、年間導入量を設置単価のみの関数としている。しかし実際は、売電単価、機器の寿命、電力系統との接続規格の標準化等、複数の要因が発電導入量に影響を及ぼす。設置単価以外の要因を考慮した再生可能エネルギー普及量の予測モデルの開発が今後の課題である。

Fig.11 Predicted PV installed capacity

Fig.12 Predicted wind installed capacity

4. コスト削減目標の達成に向けた研究開発促進政策

経済産業省は、2025 年までに太陽光発電設置単価を 1kW あたり 25 万円まで低下させる目標を掲げている。この目標を達成するために必要な研究開発投資額を算出する。図 13 に、2010 年度までの民間企業および公的研究機関の研究開発予算の推移、および目標達成に必要な 2011 年度以降の研究開発投資額を示す。また、図 14 に、コスト削減目標を達成するケースでの設置単価の予測推移を示す。図 13 から、日本政府のコスト低下目標の達成には、2011 年度以降の民間企業の研究開発投資を 2010 年度比で約 4 倍の年間 800 億円程度まで行う必要がある。同時に、公的研究機関の研究開発予算も 2010 年度比で約 4 倍の年間 300 億円程度が必要である。民間企業の研究開発投資を促すためには、税制優遇が効果的だと考えられる。年間 300 億円という公的研究機関への研究開発予算は、決して不可能な規模ではない。2010 年度の日本のエネルギー変換技術に対する研究開発費は約 4,000 億円である (IEA, 2012)。その大半は原子力発電関連の研究開発費であり、予算の組み替えによって太陽光発電技術への研究開発予算を増額することは十分に可能であると考えられる。

Fig.13 Required R&D budgets for the METI cost target

Fig.14 Trajectory of capital costs of PV systems in the METI target case

5. 結 言

再生可能エネルギー技術に対する研究開発投資と技術習熟の関係性を定量的に評価した。また、技術習熟が再生可能エネルギーの普及に及ぼす影響を定量的に示した。解析手法としては、二因子習熟モデルを拡張した三因子習熟モデルを設定し、回帰分析を用いて解析を行った。以下に、本論文によって明らかになったことを示す。

- ・ 研究開発による習熟要因を、民間企業による研究開発と大学等の公的研究機関による研究開発に分けることによって、民間企業と公的研究機関の研究開発の特徴の相違をモデルに反映できる。
- ・ 太陽光発電に対する研究開発では、公的研究機関と比べて民間企業の方が設置単価に及ぼす影響が大きい。民間企業による研究開発の習熟率は 15.7% であるのに対し、公的研究機関による研究開発の習熟率は 13.2% であった。
- ・ 研究開発費の増減は、太陽光発電、風力発電ともに、将来の設置単価に大きな影響を及ぼす。太陽光発電技術に対する研究開発費を年率 5% ずつ増加させる場合、2050 年には \$1,400/kW 程度まで設置単価が低下する可能性がある。
- ・ 2025 年までに太陽光発電設置単価を \$2,500/kW まで低下させる目標を達成するためには、民間企業および公的研究機関への研究開発費を現状比で約 4 倍まで増加させる必要がある。

本研究では、研究開発費と累積生産量が増加することによって設置単価が低下するモデルを構築したが、生産量の予測には不確実性が存在する。本モデルでは、生産量を設置単価の関数と定義したが、実際には、再生可能エネルギーの普及量はエネルギー政策や需要家の環境意識等の影響を受ける。特に、固定価格買取制度は、需要家に大きな経済的インセンティブを与えることから、再生可能エネルギーの普及量の予測において売電単価を無視することはできない。売電単価等の要因を習熟モデルに反映させることが今後の課題である。

太陽光発電の習熟解析では日本を対象とし、風力発電の習熟解析では全世界を対象とした。しかし、本モデルの技術習熟要因はマクロ経済的要因であるため、一企業や地方自治体を解析対象とすることはできない。また、技術習熟によって設置単価が上昇する技術への応用も難しい。例えば、原子力発電は、設置単価の低下よりも安全性が求められることから、本モデルの適用は難しい。

太陽光発電と風力発電だけでなく、複数のエネルギー変換技術に対して本モデルを応用することによって、研究開発予算の費用効率を比較することができる。特に、公的な研究開発は税金を投入するので、効率的な研究開発が求められる。科学技術政策の立案の際に、本モデルによる評価結果が、研究開発の予算規模策定の支援材料として活用されることを期待したい。

文 献

- 経済産業省、資源エネルギー庁、風力発電の現状について、第 29 回総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会配布資料 (2008)。
- Barreto, L., and Kypreos, S., Endogenizing R&D and market experience in the “bottom-up” energy-systems ERIS model, *Technovation*, Vol. 24, No. 8 (2004), pp. 615-629.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Solar generation 6; Solar photovoltaic electricity empowering the world, EPIA (2011).
- Gritsevskiy, A., and Nakicenovic, N., Modeling uncertainty of induced technological change, *Energy Policy*, Vol. 28, No. 1 (2000), pp. 907-921.
- International Energy Agency (IEA), Energy Technology R&D Database, IEA, www.iea.org/stat.htm (参照日 2012 年 1 月 16 日)。
- International Energy Agency (IEA), Wind energy annual report, IEA (1998-2010)。
- International Energy Agency - Photovoltaic Power System Programme (IEA-PVPS), Trends in Photovoltaic Applications. Survey Report of Selected IEA Countries, IEA (1998-2010)。
- 太陽光発電協会、日本における太陽電池出荷量の推移, <http://www.jpea.gr.jp/pdf/qlg2010.pdf> (参照日 2012 年 2 月 23 日)。
- 日本学術振興会、科学研究費補助金データベース, <http://kaken.nii.ac.jp/> (参照日 2012 年 2 月 23 日)。
- Kobos, P., Erickson, J., and Drennen, T., Technological learning and renewable energy costs: implications for US renewable energy policy, *Energy Policy*, Vol. 34, No. 13 (2006), pp. 1645-1658.

- 楠朋也, 古林敬顕, 中田俊彦, 技術進歩を内生化したエネルギー経済モデルの開発と CO₂ 回収貯留技術の導入可能性評価, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77, No. 780 (2011), pp. 1672-1686.
- 環境省, 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書 (2011).
- 明城聡, 大橋弘, 住宅用太陽光発電の普及に向けた公的補助金の定量分析, 文部科学省科学技術政策研究所第 1 研究グループ (2009).
- Nakata, T., and Lamont, A., Analysis of the impacts of carbon taxes on energy systems in Japan, Energy Policy, Vol. 29, No. 2 (2001), pp. 159-166.
- Nakicenovic, N., Grübler, A., and McDonald, A., Global energy: perspectives (1998), Cambridge University Press.
- NEDO, NEDO 研究開発プロジェクトの社会・経済等への効果の定量的把握手法に関する調査, 平成 19 年度成果報告書 (2008).
- NEDO, 太陽光発電ロードマップ (PV2030+) 「2030 年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)に関する見直し検討委員会」報告書 (2009).
- Neij, L., Dannemand Andersen, P., Durstewitz, M., Hoppe-Kilpper, M., and Morthorst, P.E., Experience curves: a tool for energy policy assessment, Environmental and Energy Systems Studies, Extol project final report (2003).
- Nemet, G.F., Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics, Energy Policy, Vol. 34, No. 17 (2006), pp. 3218-3232.
- 新エネルギー導入促進協議会, 平成 20 年度住宅用太陽光発電システム導入状況に関する調査, <http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/0900817.pdf> (参照日 2012 年 2 月 23 日).
- Nordhaus, W.D., The perils of the learning model for modeling endogenous technological change, Cowles Foundation Discussion Paper, No. 1685 (2009), pp.1-19.
- Rafaj, P., and Kypreos, S., Internalization of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model, Energy Policy, Vol. 35, No. 2 (2007), pp. 828-843.
- Smekens-Ramirez Morales, K.E.L., Response from a MARKAL technology model to the EMF scenario assumptions, Energy Economics, Vol. 26, No. 4 (2004), pp. 655-674.
- 総務省統計局, 科学技術研究調査報告附帯調査「エネルギー研究調査」 (1977-1998).
- The European Wind Energy Association (EWEA), Pure Power, Wind energy targets for 2020 and 2030, EWEA (2009).
- The Wind Power, Wind turbines and wind farms database, <http://www.thewindpower.net/> (参照日 2012 年 1 月 18 日).
- U.S. Department of Energy (DOE), Financial assistance funding opportunity announcement, Funding Opportunity Announcement Number: DE-FOA-0000566, Announcement Type: Modification 002, CFDA Number: 81.087 (2011).
- Watanabe, C., Nagamatsu, A., and Griffy-Brown, C., Behavior of technology in reducing prices of innovative goods - an analysis of the governing factors of variance of PV module prices, Technovation, Vol. 23, No. 5 (2003) pp. 423-436.
- Wright, T.P., Factors affecting the cost of airplanes, Journal of the Aeronautical Science, Vol. 3, No. 4 (1936), pp. 122-128.

References

- Agency for Natural Resources and Energy, Current situation of wind power in Japan, 29th Sougou shigen enerugi tyousakai shin-enerugi buhai shiryō (2008) (in Japanese).
- Barreto, L., and Kypreos, S., Endogenizing R&D and market experience in the “bottom-up” energy-systems ERIIS model, Technovation, Vol. 24, No. 8 (2004), pp. 615-629.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Solar generation 6; Solar photovoltaic electricity empowering the world, EPIA (2011).
- Gritsevskiy, A., and Nakicenovic, N., Modeling uncertainty of induced technological change, Energy Policy, Vol. 28, No. 1 (2000), pp. 907-921.
- International Energy Agency (IEA), Energy Technology R&D Database, IEA, www.iea.org/stat.htm (accessed 16 January 2012).
- International Energy Agency (IEA), Wind energy annual report, IEA (1998-2010).
- International Energy Agency - Photovoltaic Power System Programme (IEA-PVPS), Trends in Photovoltaic Applications. Survey Report of Selected IEA Countries, IEA (1998-2010).

- Japan Photovoltaic Energy Association, PV shipment transition in Japan, <http://www.jppea.gr.jp/pdf/qlg2010.pdf> (accessed 23 February 2012) (in Japanese).
- Japan Society for the Promotion of Science, Database of Grants-in-Aid for Scientific Research, <http://kaken.nii.ac.jp/> (accessed 23 February 2012) .
- Kobos, P., Erickson, J., and Drennen, T., Technological learning and renewable energy costs: implications for US renewable energy policy, *Energy Policy*, Vol. 34, No. 13 (2006), pp. 1645-1658.
- Kusunoki, K., Furubayashi, T., and Nakata, T., Development of an energy economic model with endogenous technical progress and feasibility study of CCS systems, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 77, No. 780 (2011), pp. 1672-1686 (in Japanese).
- Ministry of the Environment, Investigation of renewable energy installation potential (2011).
- Myojou, S., Ohashi, H., Quantitative analysis of public subsidy for PV installation in residential sector, National Institute of Science and Technology Policy, Discussion paper No. 56 (2009) .
- Nakata, T., and Lamont, A., Analysis of the impacts of carbon taxes on energy systems in Japan, *Energy Policy*, Vol. 29, No. 2 (2001), pp. 159-166.
- Nakicenovic, N., Grübler, A., and McDonald, A., *Global energy: perspectives* (1998), Cambridge University Press.
- NEDO, Investigation of quantitative methodology for analysis of NEDO research and development project effects on society and economy (2008) (in Japanese).
- NEDO, Photovoltaic Roadmap (PV2030+) (2009) .
- Neij, L., Dannemand Andersen, P., Durstewitz, M., Hoppe-Kilpper, M., and Morthorst, P.E., Experience curves: a tool for energy policy assessment, *Environmental and Energy Systems Studies*, Exttool project final report (2003).
- Nemet, G.F., Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics, *Energy Policy*, Vol. 34, No. 17 (2006), pp. 3218-3232.
- New Energy Promotion Council, Investigation of PV installation in residential sector, <http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/0900817.pdf> (accessed 23 February 2012) (in Japanese).
- Nordhaus, W.D., The perils of the learning model for modeling endogenous technological change, *Cowles Foundation Discussion Paper*, No. 1685 (2009), pp.1-19.
- Rafaj, P., and Kypreos, S., Internalization of external cost in the power generation sector: Analysis with Global Multi-regional MARKAL model, *Energy Policy*, Vol. 35, No. 2 (2007), pp. 828-843.
- Smekens-Ramirez Morales, K.E.L., Response from a MARKAL technology model to the EMF scenario assumptions, *Energy Economics*, Vol. 26, No. 4 (2004), pp. 655-674.
- Statistics Japan, Kagaku-gijutsu kenkyuutyousahoukokuhutaityousa Enerugi kenkyuu tyousa (1977-1998) (in Japanese).
- The European Wind Energy Association (EWEA), Pure Power, Wind energy targets for 2020 and 2030, EWEA (2009).
- The Wind Power, Wind turbines and wind farms database, <http://www.thewindpower.net/> (accessed 18 January 2012).
- U.S. Department of Energy (DOE), Financial assistance funding opportunity announcement, Funding Opportunity Announcement Number: DE-FOA-0000566, Announcement Type: Modification 002, CFDA Number: 81.087 (2011).
- Watanabe, C., Nagamatsu, A., and Griffy-Brown, C., Behavior of technology in reducing prices of innovative goods - an analysis of the governing factors of variance of PV module prices, *Technovation*, Vol. 23, No. 5 (2003) pp. 423-436.
- Wright, T.P., Factors affecting the cost of airplanes, *Journal of the Aeronautical Science*, Vol. 3, No. 4 (1936), pp. 122-128.