

研究論文・学習曲線による新エネルギーのコスト分析

Cost Analysis of Renewable Energy by Learning Curve

日本太陽エネルギー学会、
Vol.25, No.5 (1999)に掲載

槌屋治紀¹
Haruki Tsuchiya

Abstract

The cost analysis of renewable energy becomes more important for energy planning toward sustainable future. The photovoltaic(PV) cost analysis based on learning curve showed nearly 82% progress rate by Japanese historical PV data in the last decades. Learning curve and logistic curve were combined to calculate future energy cost and deployment rate of renewable energy. This model was introduced to macro economic and energy sectors models for long term simulation of energy demand and supply planning in Japan. Some points related with learning curve, such as effects of subsidies, technology used and deployment rate are discussed.

キーワード：学習曲線、進歩指数、太陽光発電、再生可能エネルギー、エネルギーモデル構築

Key Words: Learning Curve, Progress Rate, Photovoltaics, Renewable Energy, Energy Model Building

1. はじめに

1997年末に行われた地球温暖化防止京都会議(COP3)の議定書に見られるように、21世紀において地球温暖化の危険を減少させ、持続的な未来のエネルギー計画を立てるためには、二酸化炭素の排出量が少ないエネルギー計画が必要である。そのためには、エネルギー利用効率を向上させて、必要なエネルギー量を減少させ、同時に二酸化炭素を排出しない太陽エネルギーなどの新エネルギーの供給を拡大してゆく必要がある。

エネルギー効率の高い省エネルギー技術についてはすでに経済性のある投資になっているものが多い。しかし、太陽エネルギーなど新エネルギーについては、技術開発が進行中であり次第にコストが低下しているが、まだ経済性のある投資にはなっていないものが多い。新エネルギーは初期投資が大きく、長期間にわたってその投資が回収される特性がある。技術開発を促進させながら同時に需要を開拓して量産化を進めてゆく政策が必要になっている。このため、量産化によりどの程度のコスト低下が可能なのかという予測が必要になる。

これまで多くの場合、これらの技術予測はその技術の研究開発をしている専門家によって行われ、いつごろいくらになるであろうという予測が行われていた。この例は、PV(太陽光発

電)の場合に見ることができるよう、横軸に時間を、縦軸にピークWあたりコストをとり、右下がりの曲線によって示されている。このような従来の技術予測によるコスト低下の予測は以下のような特徴をもっている。

- (1) コスト低下の数値はその分野の専門家による推測であり、定量的な根拠は示されない。
- (2) コスト低下の説明変数は時間軸であり、時間がたてば自動的にそうなるという誤解を招きやすい。
- (3) コスト低下を引き起こすドライビングフォースは研究開発であり、研究開発の重要性を示すことが多い。

エネルギー計画モデルを作成する経済学者達は、将来のエネルギー需給を計算するために、政策によって結果が変化するような根拠のあるモデルを探していた。説明変数を時間軸にとった技術予測モデルはこのような要求を完全に満足させることができなかった。学習曲線によるコスト低下のモデル化はそのような要求にこたえようとする試みである。学習曲線の特徴は以下の2点である。

- (1) 過去のデータによってモデルの妥当性が検証できる。
- (2) 時間ではなく生産活動に応じてコスト低下が生じるモデルであり、政策の効果や妥当性を検討できる。

¹株式会社 システム技術研究所 (Research Institute for Systems Technology)

本論文では、日本における学習曲線を利用した新エネルギーのモデル化と長期エネルギー需給モデルへの適用について述べ、また適用にあたって生じるいくつかの問題点について検討した。

2. 学習曲線

学習曲線は、継続して行われる人間活動が知識と経験を蓄積してゆき、より無駄をなくし巧妙に行われることをモデル化するものである。過去の多くの工業製品に関する実測結果から、以下のような学習曲線の原理が導き出されている。⁽¹⁾

「累積生産量が2倍になるとき、生産コストや生産に要する時間が一定割合だけ低下する」

学習によって低下するのはコストだけでなく生産に要する時間などがあるが、ここではコストに絞って話をすすめる。

学習曲線を定式化すると以下ようになる。

$$Y_n = A X^{-\beta} \quad (1)$$

ここで Y_n : n番ユニットの単位あたりのコスト

X : 1からn番ユニットまでの累積生産量

A : 第一番ユニットの生産コスト

β : 累積生産に伴うコストの減少割合

さらに X_a と X_b という二つの時期の累積生産量がちょうど2倍になる場合に

$$X_b = 2 X_a \quad (2)$$

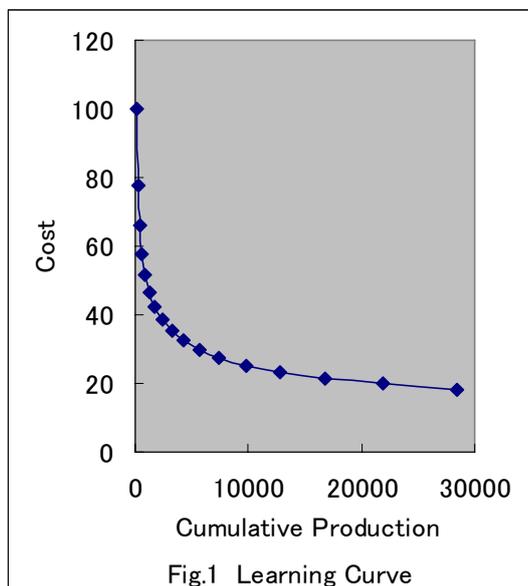
進歩指数 (Progress Rate) F を以下のように定義する。

$$F = Y_b / Y_a = X_b / X_a = 2^{-\beta} \quad (3)$$

F と β は以下のような関係がある。

$$\beta = -\log F / \log 2 \quad (4)$$

すなわち、進歩指数 F は累積生産量が2倍になるときのコスト低下の割合を示している。この値が小さければそれだけコスト低下の度合いが大きい。



学習曲線のグラフは、横軸に累積生産量を取り、縦軸にコストをとると図1のようになる。初期には急激にコストが低下するが、次第にそのコスト低下の割合は緩やかなものになっていき、最終的には定常状態に近づいてゆく。

進歩指数 F は、一般に資本集約的産業では小さく、労働集約的産業では大きいことが知られている。過去の計測によれば、半導体産業では70—80%、機械組立て産業では80—90%とされている。進歩指数が小さいと累積生産量が增大するにしたがって、極めて大きなコスト低下が実現されることになる。学習曲線に関して注意すべきは以下の2点である。

- (1) 学習曲線は時間に関して何も言っていない。累積生産量がいつ2倍になるかは不明である。
- (2) 累積生産量は、初期からの生産を積み重ねてゆくので、初期段階では生産コストの低下傾向が大きい。次に累積生産量が2倍になるのに時間がかかるようになり、いつまでもコストが下がり続けることを保証するものではない。

新エネルギーの分野で始めて行われた学習曲線に関する研究は、文献1であり、太陽熱発電装置のヘリオスタットの将来のコスト予測が試みられている。

3. 日本におけるPV (太陽光発電) の学習曲線

文献2において日本におけるPVのデータを利用して、学習曲線に関する分析を行った。⁽²⁾ PVのコストは、1988年までのNEDO発表のモジュールコストである。一般にシステムコストは、モジュールコストにBOSコスト (Balance of Systems Cost) として、インバータ、工事費などを含めるので、モジュールコストの2倍になるとされていたが、最近では、この数値は2倍より小さくなっている。このとき最終的に供給される電力コストは、システムコストをもとにして日本における年間平均日照量1000時間、耐用年数 (例えば20年)、金利の想定により計算できる。この電力供給コストと実際にある各種の電力需要を比較することにより、1979—1988年のデータを用いて、既におこなった分析では以下の結論が得られた。⁽²⁾

(1) 小規模需要への供給

離島、灯台、遠隔地などの小規模需要への電力供給価格は、一般的な電力価格よりも高価である。それゆえPVは現在でもこの分野ではディーゼル発電機などと競合可能であり、供給規模を拡大しながら累積生産量を増加させてゆくことが可能である。

(2) 大規模需要への供給

家庭、公共部門、工場などの一般的な電力需要にPVから電力を供給するようになるには、20—30円/kWhの電力価格

になる必要があり、学習曲線と需要曲線の交点をもとめると、競争的になるのに必要な累積生産量を求められる。結果はFの仮定値により変化し、1400 (F=76%) ~8000MW (F=80%) 程度になった。

今回、新しく最近までのPVデータ(1979—1998)にもとづいて回帰分析を行った。1994年まではモジュールコストを2倍してシステム価格とし、1995年以後はシステム価格が公表されているので、これを利用して表1のような数値を得た。

PVのシステム価格を卸売物価指数(WPI)で割り戻し、累積生産量との関係をもとめると以下のような結果が得られた。

$$\text{LOG}(Y / \text{WPI}) = 6.01452 - 0.276582 \text{ LOG}(X) \quad (5)$$

(決定係数 $R^2=0.9209$ 標準偏差 $\sigma=0.181$)

Table 1. 太陽電池生産および価格データ

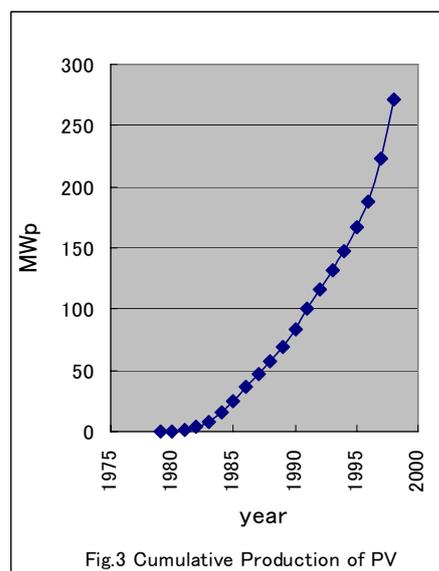
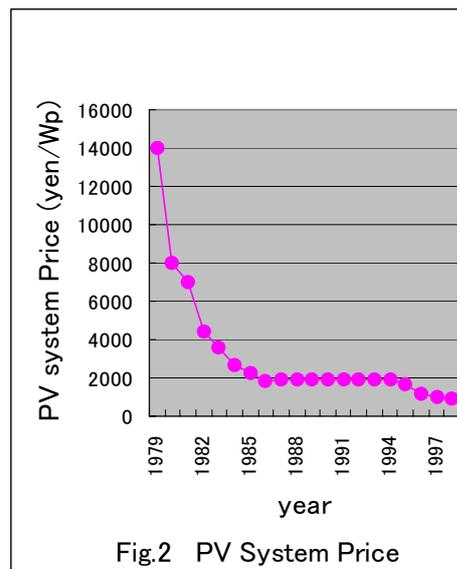
年	生産量 kW	累積生産量 kW	システム価格 円/Wp	WPI
1979	86	86	14000	99
1980	291	377	8000	111.7
1981	1,024	1,401	7000	113.2
1982	2,123	3,524	4400	114.3
1983	4,826	8,350	3600	111.6
1984	6,918	15,268	2630	112
1985	9,520	24,788	2220	108.3
1986	11,140	35,928	1812	98.3
1987	10,725	46,653	1930	96.3
1988	10,101	56,754	1926	95.6
1989	12,252	69,006	1900	99
1990	14,570	83,576	1900	100.1
1991	16,883	100,459	1934	98.9
1992	16,107	116,566	1932	97.4
1993	14,669	131,235	1900	94.3
1994	15,680	146,915	1900	92.8
1995	19,505	166,420	1700	92.2
1996	21,200	187,620	1200	93.1
1997	35,000	222,620	1000	93.6
1998	49,200	271,820	900	92

この期間においては $\beta=0.276582$ であり、進歩指数 $F=0.8255$ (82.55%) となる。図2にはPVのシステム価格、図3は累積生産量を示している。さらに1年ごとの進歩指数を計算すると、図4のようになった

この結果、以下のことがわかる。

- (1) 1979—86年には、Fは70—80%程度と飛躍的にコスト低下が生じた。
- (2) 1987—94年には、Fは大きく、コストの低下は停滞した。
- (3) 1995—98年には、Fは再び急激に小さくなり、コ

スト低下が生じている。

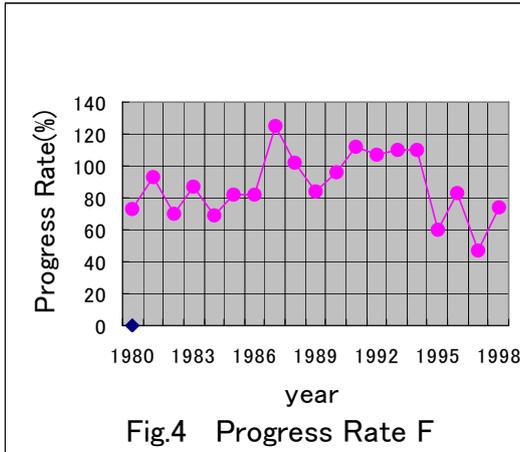


最初のコスト低下は、研究開発と生産量の拡大によるものであったが、80年代末からエネルギー価格の低迷に影響されてコスト低下が生じなかった。卸売物価指数で換算すると進歩指数が100%を越えている時期もあった。しかし、95年以降には再び、急激なコスト低下が生じている。これは政府のPV設置者に対する補助政策によって普及が推進されたためと考えられる。

4. 他の新エネルギーに関する学習曲線

他の新エネルギー分野として、太陽熱、風力発電、燃料電池における学習曲線の適用研究をおこなった。日本においては、太陽熱温水器は450万台が利用され、比較的好く普及している。生産量は1973年から年間20—40万台であったが、1980年には最高を記録し、年間76万台となっている。その後は、80年代後半の石油価格の低下に伴って、また年間2

0万台以下のレベルに低下している。その価格は20—35万円とほとんどコスト低下が変化が見られず、学習曲線に乗っていない。(3)



風力発電については、一部の企業が米国向けに生産しているが、国内では80年代末まで1万kW以下とさほど建設されなかった。しかし、ここ数年建設が活発化している。99年には2万kWを越え、2000年には5万kWになると予想されている。この風力発電システムは主としてヨーロッパからの輸入であり、国内産に比較すると極めて低いコストであり、既に既存の電力源と競合するレベルになっている。輸入製品であるため日本におけるコスト低下の歴史が不明であり、日本における風力発電に関する学習曲線の適用は、困難である。(3)

燃料電池については、まだ量産化が進んでいないが、進歩指数としては85%程度であると予想されている。いまのところ量産効果が働きにくく、また組立作業などが含まれるからと説明されているが、自動車用に小型化し大量生産されれば、進歩指数がより小さくなると考えられる。

5. 長期エネルギー需給モデルへの利用

エネルギー需給の将来像を計算するには各種の方法があるが、過去のデータによる実証性があり、因果関係を明瞭に知ることができるのは、計量モデルである。実際には計量経済モデルとエネルギー部門モデルとを結合したものが利用されている。このようなモデルに、新エネルギーの将来像を組み込む必要性があり、学習曲線モデルを利用する研究を行なった。(3)、(4) このとき、新エネルギーの導入に関しては、一定の展開率で生産を拡大してゆき、学習曲線からロジステック曲線への移行が生じるとして、以下のような考えをとった。

(1) 初期段階

この段階では、学習曲線に乗っており、累積生産量に応じてコストが低下してゆく。

実際に利用したモデルは、以下のようになっている。

$$C_t = C_0 \left(\frac{(1 + \alpha)^t - 1}{\alpha} \right)^{-\beta} \frac{WPI_t}{WPI_0}$$

C_t : t年におけるコスト

C_0 : 初年度におけるコスト

α : 展開率

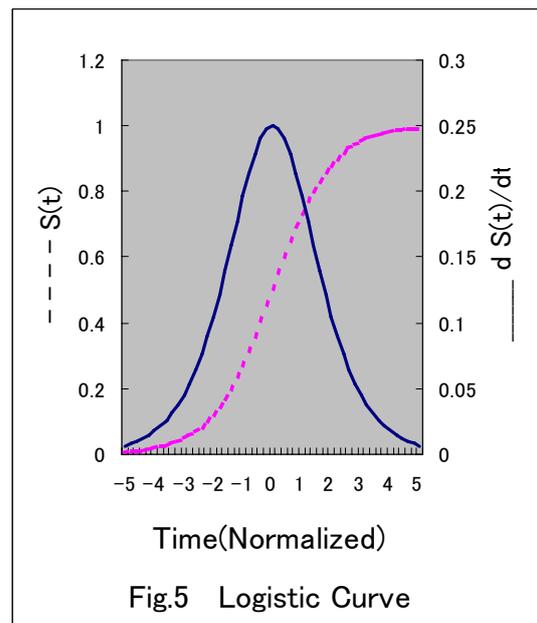
WPI_t : t年における卸売物価指数

WPI_0 : 初年度における卸売物価指数

(2) 普及開始時期

新エネルギーのコストが既存のエネルギー供給価格と競合できるようになると、爆発的な普及がはじまる。普及の原動力として既存エネルギー源とのシェア比を用いるロジステック曲線によって、時間の経過とともに普及率が高まる様子をモデル化できる。ロジステック曲線は、シェア $S(t)$ の変化を以下のように表現する。

$$S(t) = 1 / (1 + e^{-t}) \quad (\text{時間 } t \text{ を標準化})$$



また、シェア1%から50%になるまでの時間 (Take Over Time、20-30年) を仮定して計算を行う方法を検討した。この普及についてのモデルは、各エネルギー需要部門 (民生、産業、運輸) ごとに用途別 (高温熱、低温熱、電力、輸送燃料) に、最大普及した場合のシェアを想定した。その最大シェアに達するまで時間とともに普及が進行する。

6. 議論

以下には、新エネルギーに関する学習曲線の適用について、いくつかの論点をとりあげて検討した。

(1) 進歩指数

現実のデータによって学習曲線の詳細を観察すると、進歩指数の変動をみることができる。PVの進歩指数は1980年代初期では小さく、劇的なコスト低下が進行した。しかし、80年代末になると進歩指数は停滞した。これが90年代に入って再び大きく改善されている。これには、普及のための政府による補助金が効果的に作用している。

(2) 補助金

研究開発や需要拡大には補助金が有効であると考えられている。学習曲線により将来のコスト低下の想定を行い、展開率を設定すると、発電コストが既存の電力コストに一致するまでに必要な累積生産量を計算することができる。この累積生産量を達成するまでに、ある一定の補助金を交付するとすれば、補助金総額を求めることができる。

(3) 展開率

展開率は、新エネルギー導入の年間増加率である。展開率はいわば預金の金利のように幾何級数的に働き、新エネルギーの導入量を急激に増加させる。そして、展開率を設定すると、学習曲線と時間の関係を設定したことになる。この場合にも、展開率の設定によって結果は微妙に変化する。展開率は、現実的な資源の制約、設備投資の規模、資金の制約、社会制度の制約などによって決ってくるものが考慮される必要がある。

(4) 使用される技術

学習曲線の利用に関して、最も頻繁に生じる質問は「そのコスト低下はどのような技術によって可能になるか」というものであった。確かにPVを例にとれば、結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルファスシリコンなど各種の技術が競合している。これに関する答えは、「学習曲線は特定の技術には依存しない」である。学習曲線は、マクロな現象のモデル化であり、特定の技術を基礎にしている「技術予測」とは異なっている。そして、学習曲線は過去のデータにもとづいて将来のコスト低下を予測するモデルをつくることができ、定量的な予測に利用できる点が異なっている。将来の進歩指数の仮定値を小さく設定してブレークスルー的な「技術予測」の要素を含んだ、学習曲線型予測モデルをつくることも可能である。

7. 結論

新エネルギーのコストを分析し予測するための道具としての学習曲線の利用についての試みを紹介した。学習曲線は、推測による技術予測とは異なり、実証的な分析が可能であり、新エネルギーの将来のコストを検討するのに有効な手法である。新エネルギーのうちで太陽電池に関しては学習曲線による分析がきわめて有効であり、過去のデータからその進歩指数を計算することができた。しかし、太陽熱に関しては学習曲線によく適合

していない。また風力発電と燃料電池に関しては日本では累積生産量が少ないのでまだ分析が可能な段階になっていない。

学習曲線とロジステック曲線を組み合わせて利用して、新エネルギーの将来のエネルギー供給量を推定するモデルを作成し、日本におけるエネルギー需給モデルに組み込む方法について紹介した。また、こうしたモデルの利用に関するいくつかの点について考察して、進歩指数の変化、補助金、展開率の大きさなどについての議論を示した。学習曲線はエネルギー政策の立案に有効に利用できる可能性がある。

参考文献

- 1) Frank krawiec et al., An Investigation of Learning and Experience Curves, Solar Energy Institute, USA, 1980
- 2) H.Tsuchiya, Photovoltaic Cost Analysis Based on Learning Curve, Solar World Congress, 1989, Kobe, Japan
- 3) 早野拓朗、榎屋治紀、新エネルギーのモデル化とシミュレーション、エネルギー・資源、Vol.11,NO.2,1990.
- 4) 石油代替エネルギー計量分析調査、新エネルギー・産業技術開発機構、日本エネルギー経済研究所、エネルギー分析センター、1992-1998