

Learning Curve Analysis of Photovoltaic System Cost in Japan 太陽光発電システムコストの学習曲線による分析 (抜粋)

Haruki Tsuchiya
槌屋治紀*¹

Abstract

This study shows a learning curve approach of photovoltaic (PV) cost in Japan. The cost data and the amount of production data of Japanese PV between 1979 and 2015 are combined to find the progress index (Cost reduction rate when the cumulative production is doubled). The cost data is modified with the consumer price index and the corporate goods price index. Applying the amounts of cumulative PV module production as the independent variable, the regression analysis of learning curve model showed that the progress index between 1979 and 2015 is 82.6%. But it is 76.9% between 2008 and 2015. This means that the large cost reduction happened in this period. Future PV cost is estimated by extension of this progress index depending on the amount of future cumulative production of PV.

Keywords: Learning Curve, Photovoltaics, Progress Index, Learning Rate, Cumulative Production

キーワード：学習曲線, 太陽光発電, 進歩指数, 習熟率, 累積生産量

1. はじめに

これまで多くの場合、技術のコスト予測は、その技術の研究開発をしている専門家によって行われ、将来の時期と予想コストが発表されてきた。太陽光発電システムの場合には、横軸に時間を、縦軸にピークWあたりコストをとるとき、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ていない、また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印象を与えるが、コスト低下を引き起こす最大の要因は研究開発であり、研究開発の重要性を示すことが多かった。

このような予測モデルとは異なり、過去のデータを用いた実証的なモデルとして、学習曲線を利用して将来のコストを検討することが行われている。本報告では、学習曲線によって太陽光発電システムのコストを検討する既存の研究を振り返り、日本の最新のデータを利用して学習曲線を分析する試みを行っている。

2. 学習曲線の定式化

蓄積された知識や経験という学習の効果を定量的に表すには、それまでに行われた生産量の合計、すなわち累積生産量を用いるのが普通である。説明変数を累積生産量、被説明変数をコストとすると、学習曲線を定式化すると以下のようなになる。⁽¹⁾

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

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

これを自然対数形式で記述すると以下のようなになる。

$$\text{LOG}(Y_n) = \text{LOG}(A) - \beta * \text{LOG}(X) \quad (2)$$

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。

「累積生産量が 2 倍になるとき、生産コストが一定割合だけ低下する」⁽¹⁾

これを数学的に表現すると以下のようなになる。

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 倍になる場合を想定する。

$$X_b = 2X_a \quad (3)$$

このとき、進歩指数 (Progress Index) F を以下のよう
に定義する。

$$F = Y_b / Y_a = (X_b / X_a)^{-\beta} = 2^{-\beta} \quad (4)$$

β を F からもとめると以下のような関係になる。

$$\beta = -\text{LOG}(F) / \text{LOG}(2) \quad (5)$$

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。 F の数値は 1 より小さい
ので、100 をかけてパーセント表示にすることが
行われている。 F が小さければそれだけ学習効果が
大きい。たとえば $F=0.8$ のとき、累積生産量が 2 倍に
なるときにコストが 80% に低下することを示して
いる。

学習曲線は人間活動のマクロな現象のモデル化で
あり特定の技術に依存していない。太陽光発電シス
テムには、結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルフ
アシリコン、化学薄膜、色素増感型など各種の技術
があるが、本論文では特定の技術に限定していない。

ある製品の過去のデータについて、横軸に累積生産
量を取り、縦軸にコストをとって学習曲線のグラフ
を描くと、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のが普通で
ある。累積生産量の増大にもなって学習効果が生
じにくくなってゆくことがその理由である。

3. 学習曲線によるエネルギー関連の既存研究

1980 年代にエネルギーの分野で初めて行われた
学習曲線を使用した研究としては、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ある。⁽¹⁾ 著
者は、日本における太陽電池モジュールのコストデ
ータを利用して、1979-1989 年度における学習曲線
に関する分析を行った。⁽²⁾ その後 1979~1998 年度
の期間についても日本の太陽光発電のコストについ
て学習曲線による分析を行って、以下の結論を得て
いる。⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

- (1) 1979~1986 年度には、 F は 70~80% 程度であり、
飛躍的にコスト低下が生じている。
 - (2) 1987~1994 年度には、 F は大きくコスト低下は
停滞した。
 - (3) 1995~1998 年度には、 F は再び急激に小さくな
り、コスト低下が生じている。
- 1979-1998 年度の 19 年間の期間においては

$\beta=0.277$ であり、進歩指数 $F=0.826$ (82.6%) となっ
ていた。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、1980 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つ
た。しかし、1995 年度以降には再び、急激なコスト低
下が生じた。これは政府の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ている。

4. 太陽電池出荷量とコスト

図 1 には、日本における 1979~2015 年度の太陽電
池モジュールの出荷量と太陽光発電システムのコス
トの経年変化を示している。

表 1 には、1979~2015 年度の期間の太陽電池モジ
ュールの総出荷量とその累積量、太陽光発電システ
ムのコスト、ふたつの物価指数 (CGPI, CPI) の数値
データを示している。

1979~1988 年度の期間については、太陽電池のモ
ジュールコストが NEDO から新聞に毎年発表されて
おり、この数値を参照している。この期間には発電シ
ステムの利用実績は多くないので、発表されたのは
発電システムコストではなく太陽電池モジュールコ
ストである。

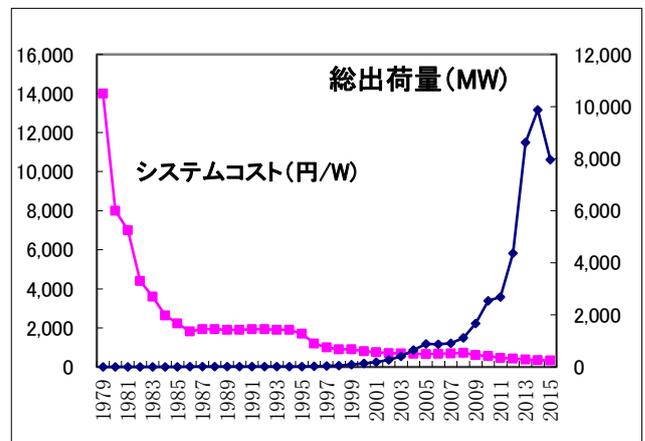


Fig.1 PV module production and PV system cost
図 1 太陽光発電システムのコストと太陽電池モジ
ュールの総出荷量(1979~2015 年度)

ここで発電システムコストは、太陽電池モジュー
ルコストに BOS コスト (Balance of Systems Cost) とし
て、パワーコンディショナ (インバータを含む)、工
事費などの合計である。多くの場合、太陽光発電シ
ステムコストのうち 40~50% を太陽電池モジュール
コストが占めている。そこでこの期間については、太

太陽発電システムコストが太陽電池モジュールコストの2倍になるとして表1に示している。1989年度以降は太陽光発電システムのコストが発表されており、また最近では、FIT(固定価格買い取り制度)に関する委員会が2011~2015年度についての詳細な太陽光発電システムコストを発表しており、⁽⁷⁾ 表1にはこの数値を含めている。

2015年度における太陽電池モジュールの累積総出荷量は4355万kW、発電システムのコストは33万円/kWである。

Table 1. PV module production, PV system cost and Price Indexes

表1. 太陽電池モジュール生産量, コスト, 物価指数

年度	総出荷量 (kW)	累積総出荷量 (kW)	COST (円/W)	CGPI	CPI
1979	86	86	14,000	101.7	72.9
1980	291	377	8,000	114.4	78.4
1981	1,024	1,401	7,000	114.6	81.5
1982	2,123	3,524	4,400	114.9	83.6
1983	4,826	8,350	3,600	114.1	85.2
1984	6,918	15,268	2,630	114.4	87.1
1985	9,520	24,788	2,220	112.5	88.8
1986	11,140	35,928	1,812	106.5	88.8
1987	10,725	46,653	1,930	104.7	89.2
1988	10,101	56,754	1,926	104.1	89.9
1989	12,252	69,006	1,900	106.9	92.5
1990	14,570	83,576	1,900	108.2	95.4
1991	17,827	101,403	1,934	108.7	98.0
1992	17,196	118,599	1,932	107.5	99.6
1993	14,972	133,571	1,900	105.7	100.9
1994	16,311	149,882	1,900	104.2	101.2
1995	19,198	169,080	1,700	103.1	101.0
1996	27,982	197,062	1,200	101.6	101.4
1997	43,258	240,320	1,000	102.6	103.5
1998	54,031	294,351	900	100.4	103.7
1999	94,143	388,494	900	99.6	103.2
2000	133,695	522,189	810	99.1	102.6
2001	188,590	710,779	758	96.6	101.5
2002	274,300	985,079	710	95.0	100.9
2003	407,714	1,392,793	690	94.5	100.7
2004	658,077	2,050,870	675	96.0	100.6
2005	883,759	2,934,629	661	97.7	100.4
2006	871,638	3,806,267	683	99.7	100.6
2007	911,550	4,717,817	696	102.0	101.0
2008	1,120,521	5,838,338	723	105.2	102.1
2009	1,668,531	7,506,869	606	99.8	100.4
2010	2,538,814	10,045,683	566	100.2	99.9
2011	2,685,573	12,731,256	468	101.6	99.8
2012	4,371,274	17,102,530	427	100.5	99.5
2013	8,625,377	25,727,907	380	102.4	100.4
2014	9,872,006	35,599,913	348	105.3	103.4
2015	7,956,713	43,556,626	330	101.8	103.3

(CGPIとCPIは2010年度を100とする指数である)

太陽光発電システムコストへのインフレの影響を検討するため、発表されたコストを名目コスト(COST)と考えて、この名目コストを国内企業物価指数(CGPI, Corporate Goods Price Index)または消費者物価指数(CPI, Consumer Price Index)で割り、COST/CGPIとCOST/CPIを実質コストとした。CGPIは企業間の取引における物価であり、CPIは最終消費者の購入品に関する物価指数である。

図2にはふたつの物価指数の経年変化を示している。数値は2010年度を100とした指数である。⁽⁸⁾ 太

陽光発電システムコストの問題にどちらの物価指数が適切かを検討するため、ここではふたつの指数による修正した実質コストを扱っている。

ふたつの物価指数CGPIとCPIのグラフの両者を見ると、1990年度以後には大きな差はないが、1979-1990年度ごろにはCPIが小さい値から大きな値へと増加している期間があり、このときには、名目コストを実質コストにするとき大きな数値に修正されることになる。

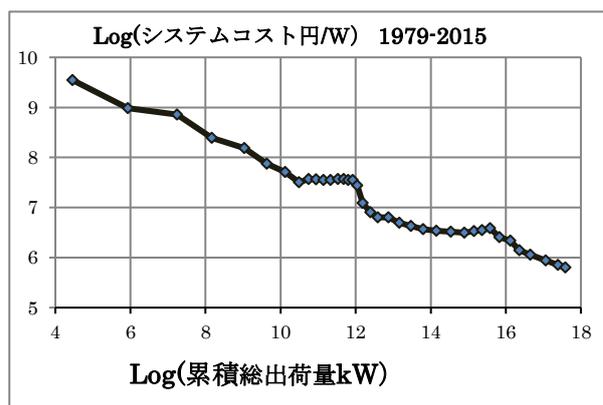


Fig.5 Double logarithmic chart of PV system cost and the cumulative production of PV module(1979-2015)

図5 両対数グラフ：太陽光発電システムのコストと太陽電池モジュールの累積総出荷量(1979~2015年度)

5. 学習曲線による分析

太陽光発電システムのコストが太陽電池の累積生産量によってどのように変化してきたかを分析する。分析方法として、ある一定期間について回帰分析によって進歩指数を求めることとした。

説明変数 $X = PV$ モジュールの累積総出荷量(kW)

被説明変数 $Y =$ 名目コスト(COST 円/W)

として回帰分析を行うと、以下ようになった。

1979~2015年度の36年間については、

$$\text{LOG}(Y) = 10.618 - 0.277 \text{ LOG}(X) \quad (5)$$

(決定係数 $R^2 = 0.964$)

このとき $\beta = 0.277$ であり、進歩指数 F は、

$$F = 2^{-\beta} = 0.826 (82.6\%) \quad (6)$$

また最近の2008~2015年度の7年間については、

$$\text{LOG}(Y) = 12.431 - 0.380 \text{ LOG}(X) \quad (7)$$

(決定係数 $R^2 = 0.971$)

このとき $\beta = 0.380$ であり、進歩指数 F は、

$$F = 2^{-\beta} = 0.769(76.9\%) \quad (8)$$

6. 学習曲線による将来予測

学習曲線の分析によって得られた進歩指数 F を用いて将来の太陽光発電システムコストを検討した。図5には、2008～2015年度の分析から得られた進歩指数 76.9%の回帰式(式7)を将来に適用して結果を示した。累積総出荷量が 200GW まで増大した場合にはシステムコストは 17.7 万円/kW に低下することを示している。

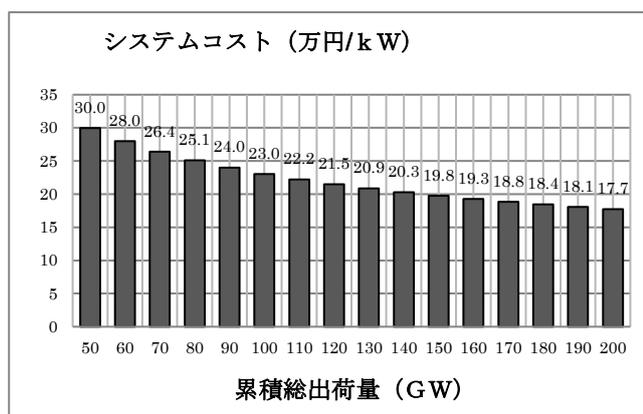


Fig.5 Prediction of future PV system cost

図5 将来の太陽光発電システムコストの予測

参考文献

- 1) Frank Krawiec et al., An Investigation of Learning and Experience Curves, Solar Energy Research Institute, USA, 1980
- 2) H.Tsuchiya, Photovoltaic Cost Analysis Based on Learning Curve, Solar World Congress, International Solar Energy Society 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) 榎屋, 学習曲線による新エネルギーのコスト分析, 日本太陽エネルギー学会誌, Vol. 25, No. 6, 1999
- 5) H.Tsuchiya, Learning Curve Cost Analysis for Model Building of Renewable Energy in Japan, Proceedings of IEA Workshop on Experience Curve for Policy Making-The Case of Energy Technologies, p.67-76, 10-11 May 1999, Stuttgart, Germany
- 6) IRENA report, Power to Change, June 2016, International Renewable Energy Association
- 7) 平成 28 年度調達価格及び調達期間に関する意見,

- 平成 28 年 2 月 22 日, 調達価格等委員会, 経産省
- 8) エネルギー経済統計要覧, 日本エネルギー経済研究所, 省エネルギーセンター発行, 2016
 - 9) 太陽光発電協会, 日本における太陽電池出荷統計 2013, 2014, 2015
 - 10) 長期エネルギー需給見通し 関連資料, 資源エネルギー庁, H27 年 7 月