

太陽光発電システムコストの 学習曲線による分析

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

2015 年末に行われた地球温暖化防止パリ会議（C O P 21）ではパリ協定を締結し、世界各国が持続的な未来のエネルギー計画を立て、二酸化炭素の排出量を削減して、地球温暖化のリスクを減少させることが宣言された。そのためには、エネルギー利用効率を向上させて、必要なエネルギー需要を減少させ、同時に二酸化炭素を排出しない太陽光発電システムなどの再生可能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、再生可能エネルギーについては、技術開発を促進させつつ同時に需要を開拓して大量生産を進めてコストを低下させてゆく政策が必要になっている。このため、再生可能エネルギーについて大量生産とコスト低下の関係を知る必要がある。

これまで多くの場合、これらの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

人間の活動が継続的に行われるときには、知識と経験が蓄積されてゆき、より効率を上げ無駄をなくし生産に必要なコストや時間が小さくなってゆくこと

*1 株式会社システム技術研究所 所長
(〒103-0004 東京都中央区東日本橋 1-1-5)

e-mail: tsuchiya@systemken.com

(原稿受付: 2016 年 6 月 24 日, 受理日: 2016 年 9 月 8 日)

が知られている。学習曲線は、この現象をモデル化したものである。以下ではコストの減少に絞って話をすすめる。

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ようになる。⁽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、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。あるいは、 $1-F$ を習熟率 (Learning Rate) と呼んで、これを 100 倍してパーセント表示にしてコスト削減割合を表すこともある。習熟率が大きければ、それだけ学習効果が大きいことを示している。

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。⁽¹⁾ 進歩指

数が小さいと累積生産量が増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。ただし、学習曲線は、累積生産量によってコスト低下の傾向を分析するものであり、累積生産量がいつ 2 倍になるかという時間的な要素については関与していない。

また、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、アモルファスシリコン、化学薄膜、色素増感型など各種の技術があるが、コストデータが入手できていないので、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と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った。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。

最近では、IRENA(国際再生可能エネルギー協会)は、世界各国の太陽光発電システムのコストデータを分析して、1984～2012 年のコスト減少の習熟率が 12%であったと報告している。これは、進歩指数が 88%であったことを意味している。そして、2025 年までに太陽光発電システムのコストが 59%低下すると予測している。⁽⁶⁾

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。

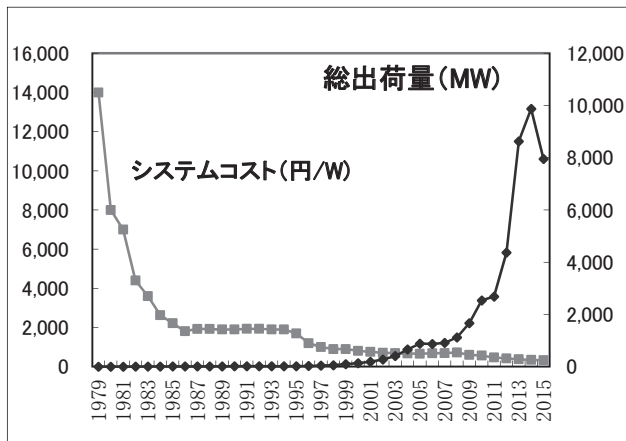


Fig.1 PV module production and PV system cost

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、太陽光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)と考えると、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大きな数値に修正されることになる。

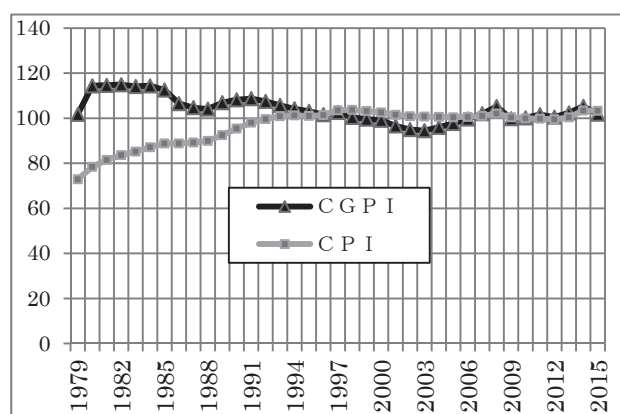


Fig.2 Price Index, CGPI and CPI

図2 物価指数 CGPI と CPI のグラフ

また、説明変数としての累積生産量については、太陽電池モジュールの総出荷量と、国内電力用出荷量のふたつを検討した。表1の総出荷量は、太陽光発電協会が発表した太陽電池の出荷統計データから作成した。⁽⁹⁾ 太陽電池モジュールの用途は、国内電力用のほかに輸出があり、さらにポケット電卓や腕時計など民生品需要にも向けられている。1979 年度から開始された太陽電池の生産は、当初は発電システムというよりもこうしたバッテリーに代わる電源として商業的に成功した。

図3には、太陽電池モジュールの出荷に占める輸出と国内電力用出荷の割合を示している。両者は互いに反対の関係があり、国内電力用出荷が少ないときには輸出が大きくなり、あるいはその逆も生じている。2008~2015 年度には国内電力用出荷が急増して輸出が小さくなっている。輸出した太陽電池モジュールにも発電用が含まれている。とくに生産量が大きくなってからは太陽電池モジュールの多くは発電用に利用されている。また民生用需要に向けられた太陽電池モジュールのコストは公表されてい

ないので分析ができない。こうした理由から、学習曲線の説明変数としては、太陽電池モジュールの累積総出荷量を採用することにした。

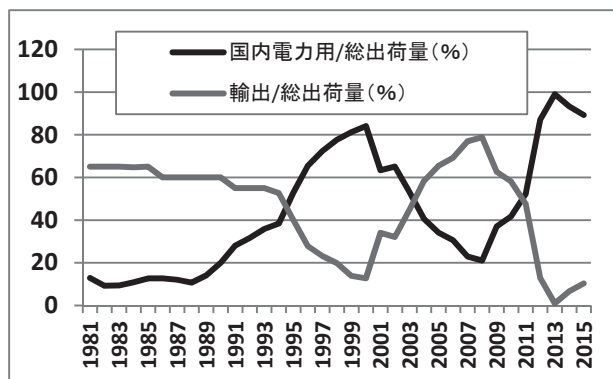


Fig.3 Share of PV module for export and for domestic power generation (%)

図3 太陽電池モジュールの出荷割合(%)

図4には、1998~2015 年度(最近の17年間)における総出荷量とシステムコストの様子を示している。2000 年から2007 年度ごろまではコスト低下は停滞していたが、2008 年度以後はふたたび大きなコスト低下を示している。

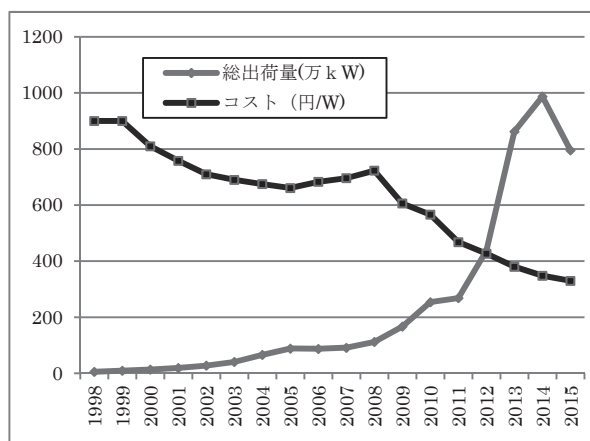


Fig.4 PV system cost and production of PV module

図4 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(1998~2015 年度)

総出荷量をみると2000 年度を過ぎてから増加しており、とくに FIT 導入によって2012 年度以後は急速に増加しているが、2015 年度には減少している。これは、急速なメガソーラーの導入に対して電力会社が発電抑制に乗り出したことの影響と考えられる。

図5には1979~2015 年度(36 年間)について横軸に太陽電池モジュール累積総出荷量、縦軸に発電

システムコストを両対数グラフで示している。グラフは右下がりであり、その傾きの大きさは式(2)における $-\beta$ の値に相当している。

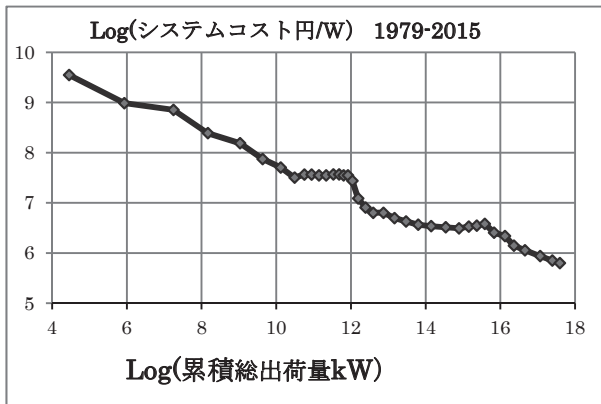


Fig.5 Double logarithmic chart of PV system cost and the cumulative production of PV module(1979-2015)

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捗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、以下のようになった。

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、進捗指数 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、進捗指数 F は、

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

この方法を用いて各種のケースの分析を行った。表2と図6には学習曲線モデルによる分析結果として異なる期間の進捗指数 F を示した。5つの計算期間として1979～1986年度、1987～1994年度、1995～1998年度、1999～2007年度、2008～2015年度、さらに全期間1979～2015年度を選んだ。また3つの被説明

変数として COST, COST/GCPI, COST/CPI を採用したときの進捗指数 F と決定係数 R^2 を示している。

Table 2 Progress Index F for selected 6 periods

表2 6つの期間における進捗指数と決定係数

期間	データ数	被説明変数					
		COST		COST/GCPI		COST/CPI	
		F(%)	R ²	F(%)	R ²	F(%)	R ²
1979-1986	8	79.69	0.980	79.30	0.992	77.95	0.992
1987-1994	8	99.52	0.116	98.95	0.119	91.53	0.978
1995-1998	4	46.65	0.901	47.87	0.894	44.95	0.908
1997-2007	9	93.53	0.717	93.08	0.893	94.11	0.721
2008-2015	8	76.87	0.971	76.60	0.979	76.31	0.983
1979-2015	37	82.56	0.964	83.17	0.967	81.21	0.962

表2において決定係数 R^2 は多くの場合 0.7～0.97程度であり、回帰分析として有効に計算されているが、1987～1994年度で説明変数を COST と COST/GCPI とした場合については非常に小さい値を示している。この期間はコスト低下がほとんど生じていない特殊な期間であった。以下には表2における進捗指数に対する各種パラメータの影響を検討した。

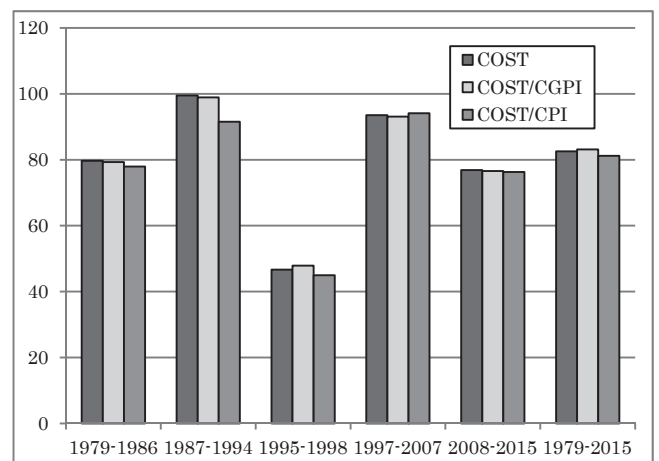


Fig.6 Progress Index F for 6 periods

図6 6つの期間における進捗指数 (F)

5.1 物価指数の影響

被説明変数として、名目コストを消費者物価指数で割った COST/CPI を用いた場合の方が、国内企業物価指数で割った COST/GCPI よりも、進捗指数がやや小さくなっていることがあるが、反対の期間もあり一概には結論できない。全体として物価指数の影響はそれほど大きくはないことがわかった。

5.2 期間の影響

歴史的な変化をみると1980年代に比較して2000年代前半には進捗指数 F が大きくなっており、コスト低下の度合いが小さくなっていることがわかる。進捗指数 F は1979～1986年度には77～79%であった

が、1987-1994 年度には 100%に近くなりコスト低下が生じなかった。しかし 1995-1998 年度には 45%と極めて小さくなり、この時期に非常にコスト低下が進展している。その後 1997-2007 年度には 95%と大きくなり、コスト低下は進まなかったが、2008-2015 年度には 76.9%と再び小さくなっており、この期間におけるコスト低下が大きいことを示している。

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。

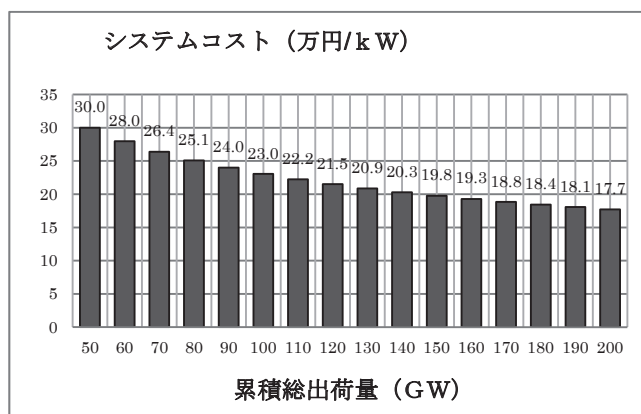


Fig.5 Prediction of future PV system cost

図 5 将来の太陽光発電システムコストの予測

政府の長期需給見通しでは 2014 年に PV 設置量は 21GW、PV 電力コストは 24 円/kWh であり、2030 年には設置量は 64GW、PV 電力コストは 12.7～15.6 円/kWh(平均すると 14.15 円/kWh)としている。⁽¹⁰⁾ 2014 年の累積総出荷量は 35.6GW、コストは 34.8 万円/kW である。今後、輸出量が再び延びるなどによってこれまでの累積生産量（出荷量）と設置量の比率が維持されて推移するものと仮定すると、2030 年に設置量が 64GW になるときは、比例計算から累積生産量は $64 \times 35.6 / 21 = 108\text{GW}$ になる。図 5 からこのときのシステムコストは 22.2 万円/kW になり、PV 電力コストは比例計算から $22.2 \times 24 / 34.8 = 15.3$ 円/kWh になる。このような場合は、2030 年の PV 電力コストは長期需給見通しの値に近い値になることがわかる。

7. 結論

太陽光発電システムのコストを学習曲線によって分析した既存研究について定量的なモデルとしての有効性を検討し、学習曲線の進歩指数がコスト低下の程度を表すことを示した 1979～2015 年度の期間のコストについて回帰分析を行って進歩指数をもとめた。太陽光発電システムのコストを、ふたつの物価指数(CPI と CGPI)によって修正評価した実質コストを用いて分析したが違いは大きくなかった。1979～2015 年度の全期間を含む 6 つの期間について学習曲線の分析をおこなった結果、47～100%の進歩指数が得られた。2008～2015 年度の期間に得られた進歩指数 76.9%を将来に適用した場合に、累積総出荷量が 200GW になるときのシステムコストを推定した結果は 17.7 万円/kW となった。

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, 槌屋治紀, 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) 槌屋, 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