

A Proposal of a practical assessment method of maximum power of PV modules at standard test condition outdoors

屋外で太陽電池モジュールの基準状態の最大出力を判定する実用的方法の提案

Kazuhiko Kato
加藤 和彦

Abstract

This paper proposes a practical method that can assess maximum power (P_{max}) of PV module at standard test condition (STC) by using various I-V characteristics measured outdoors. This method needs not irradiance nor PV module temperature but the PV module that has I_{pm} , V_{pm} , I_{sc} and V_{oc} at STC (Base module). Sample statistics based on measured I-V characteristics of seven different PV modules (Target modules) showed linearity of four parameters which provided P_{max} between the Base module and the Target modules, and it was suggested that the method could estimate P_{max} of PV module at STC which was not less than 85% of its initial value with an error of 3-5%. In addition, Bayesian statistics indicated that the method might make it possible to assess whether P_{max} at STC of PV module decreased to 10% with several measurements.

Keywords: PV module, I-V characteristics, Outdoor measurement, Maximum power assessment, Sample statistics, Bayesian statistics

キーワード: 太陽電池モジュール, 電流－電圧特性, 屋外測定, 発電性能評価, 標本統計, ベイズ統計

1. 主題

本論文の主題は、屋外で取得された情報から基準状態 (STC : Standard Test Condition) における太陽電池モジュールの最大出力を判定する方法を提案し検証することである。また、実用性の観点からは、それが日射強度及び太陽電池モジュール温度の情報の取得が必須ではないことや、少ない取得機会での判定が可能であることを例示することである。

基本的性質が同じ二枚の太陽電池モジュールの電流－電圧特性を、同一自然環境下 (日射強度及び太陽電池モジュール温度) で取得したとき、それぞれの太陽電池モジュールの電流および電圧が日射強度および太陽電池モジュール温度に対してどのような関数形であったとしても、二枚の太陽電池モジュールの最大出力を規定する何らかの要素には線形性が保存されている。

2. 仮説とその具体化

この主題を実現するために筆者が立てた仮説は以下である。

国立研究開発法人産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1)

e-mail: kazuhiko.kato@aist.go.jp

(原稿受付: 2016 年 3 月 7 日, 受理日: 2016 年 4 月 28 日)

この仮説が成り立つとすれば、以下のようにして、一方の太陽電池モジュールの STC における最大出力を推定することが可能である。

ある日射強度 $G[\text{W/m}^2]$ および太陽電池モジュール温度 $T[^\circ\text{C}]$ における太陽電池モジュールの電流－電圧特性を概念的に示した図 1 において、最大出力点 P_m は一次関数 a と一次関数 b の交点であり、それぞれの関数は $I_{sc}(G, T)[\text{A}]$, $V_{oc}(G, T)[\text{V}]$, $R_a(G, T)[\Omega]$ および $R_b(G, T)[\Omega]$ という四つの要素を用いて記述することができる。すなわち、

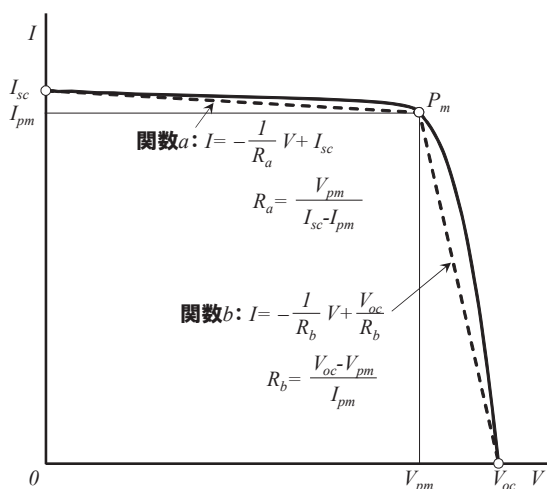


図1 太陽電池モジュールの電流－電圧特性と
 P_m を規定する四要素(概念図)

$$\text{関数 } a : I = -\frac{I}{R_a(G,T)} V + I_{sc}(G,T) \quad \text{式(1)}$$

$$\text{関数 } b : I = -\frac{1}{R_b(G,T)} V + \frac{V_{oc}(G,T)}{R_b(G,T)} \quad \text{式(2)}$$

いま、ここに基本的性質が同一な(たとえば、ともに結晶シリ

コン系の)二枚の太陽電池モジュールがあるとする。一方の太陽電池モジュールK(Known:以下「既知モジュール」)は初期状態からの出力低下がなくかつ STC の四要素($I_{sc,K,STC}$, $V_{oc,K,STC}$, $R_{a,K,STC}$, $R_{b,K,STC}$)が既知である。これに対して他方の太陽電池モジュールU(Unknown:以下「未知モジュール」)は STC の四要素($I_{sc,U,STC}$, $V_{oc,U,STC}$, $R_{a,U,STC}$, $R_{b,U,STC}$)が未知である。

この二枚の太陽電池モジュールの電流－電圧特性曲線を、同一自然環境下(G 及び T)で取得し、それぞれについて得られた四要素($I_{sc,K}(G,T)$, $V_{oc,K}(G,T)$, $R_{a,K}(G,T)$, $R_{b,K}(G,T)$, $I_{sc,U}(G,T)$, $V_{oc,U}(G,T)$, $R_{a,U}(G,T)$, $R_{b,U}(G,T)$)が次の線形(比例)関係をもっているとする。

$$I_{sc,U}(G,T) = r_i I_{sc,K}(G,T) \quad \text{式(3)}$$

$$V_{oc,U}(G,T) = r_v V_{oc,K}(G,T) \quad \text{式(4)}$$

$$R_{a,U}(G,T) = r_a R_{a,K}(G,T) \quad \text{式(5)}$$

$$R_{b,U}(G,T) = r_b R_{b,K}(G,T) \quad \text{式(6)}$$

ただし、 r_i , r_v , r_a , r_b は取得データから得られる既知モジュールKと未知モジュールUの I_{sc} , V_{oc} , R_a , R_b の間の比例定数

すると、未知モジュールUのSTCにおける四要素($I_{sc,U,STC}$, $V_{oc,U,STC}$, $R_{a,U,STC}$, $R_{b,U,STC}$)は以下の式で求めることができる。

表1 仮説の検証に用いた太陽電池モジュールの諸特性

項目		既知モジュール K	未知モジュール U _n						
			U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U ₇
製造者		KIS	京セラ				シャープ		
型式		GT40	SPG167-04			SPG1786 T-02KDX	ND-170A A	NT-132BJ	
種類		単結晶 Si	多結晶 Si			多結晶 Si	多結晶 Si	単結晶 Si	
銘板値	P_{max} [W]	48	167			179	170	132	
	V_{pm} [V]	18.2	23.2			23.8	21.4	26.8	
	I_{pm} [A]	2.64	7.20			7.51	7.96	4.93	
	V_{oc} [V]	22.4	28.9			29.4	26.0	33.5	
	I_{sc} [A]	2.84	8.00			8.15	8.60	5.53	
工場出荷値	P_{max} [W]	-	171	173	171	-	-	134	134
	V_{pm} [V]	-	23.0	23.2	23.2	-	-	26.4	26.7
	I_{pm} [A]	-	7.40	7.44	7.34	-	-	5.09	5.02
	V_{oc} [V]	-	28.9	29.1	29.1	-	-	33.5	33.9
	I_{sc} [A]	-	8.11	8.04	8.14	-	-	5.68	5.58
基準状態 現在の	P_{max} [W]	50.9	161	154	153	186	174	115	92.3
	V_{pm} [V]	18.6	23.1	21.8	22.8	24.2	21.0	26.0	23.1
	I_{pm} [A]	2.73	6.97	7.05	6.71	7.67	8.26	4.45	4.00
	V_{oc} [V]	22.6	29.0	29.1	29.2	29.8	26.1	33.3	33.3
	I_{sc} [A]	2.91	7.57	7.82	7.75	8.26	8.85	5.16	5.12
出力低下率		-	5.7%	11%	10%	-	-	14%	31%
備考		未使用	約 11 年使用			未使用	未使用	約 11 年使用	

注:出力低下率=(現在の基準状態の P_{max} －工場出荷値の P_{max})/工場出荷値の P_{max}

$$I_{sc,U,STC} = r_i I_{sc,K,STC} \quad \text{式(7)}$$

$$V_{oc,U,STC} = r_v V_{oc,K,STC} \quad \text{式(8)}$$

$$R_{a,U,STC} = r_a R_{a,K,STC} \quad \text{式(9)}$$

$$R_{b,U,STC} = r_b R_{b,K,STC} \quad \text{式(10)}$$

したがって、式(1)(2)および式(7)から式(10)より、未知モジュール U の推定最大出力 $P_{max,U,STC}[W]$ は以下の式で推定することができる。

$$P_{max,U,STC} = I_{pm,U,STC} V_{pm,U,STC} \quad \text{式(11)}$$

$$I_{pm,U,STC} = \frac{r_a r_i R_{a,K,STC} I_{sc,K,STC} - r_v V_{oc,K,STC}}{r_a R_{a,K,STC} - r_b R_{b,K,STC}} \quad \text{式(12)}$$

$$V_{pm,U,STC} = \frac{r_a R_{a,K,STC}}{r_a R_{a,K,STC} - r_b R_{b,K,STC}} (r_v V_{oc,K,STC} - r_b r_i R_{b,K,STC} I_{sc,K,STC}) \quad \text{式(13)}$$

3. 仮説の立証と考察

3.1 データの取得

3.1.1 使用した太陽電池モジュール

この仮説の立証に用いた太陽電池モジュールを表 1 に示す。

既知モジュール K は、KIS 製の単結晶シリコン太陽電池モジュールである。他方、未知モジュール U_n として使用したのは、四枚の京セラ製多結晶シリコン太陽電池モジュール (U_1 , U_2 , U_3 , U_4) および一枚のシャープ製多結晶シリコン太陽電池モ

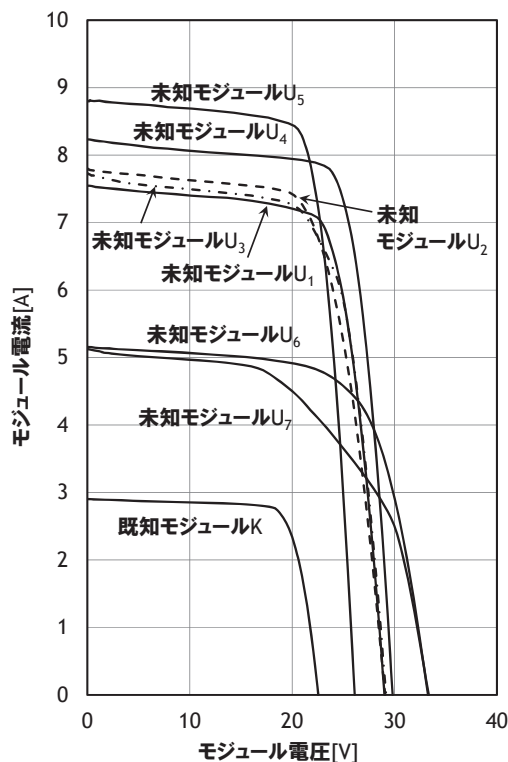
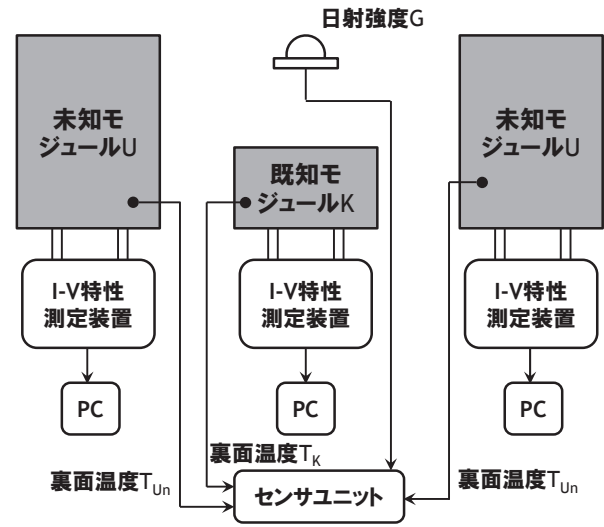
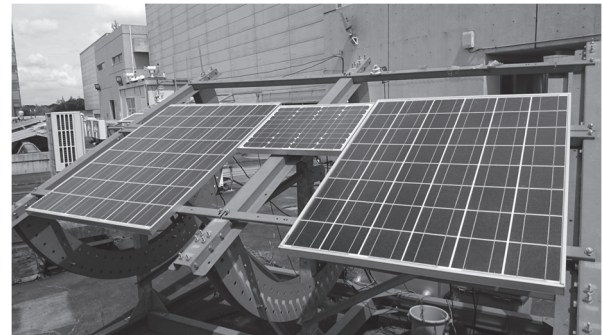


図 2 各太陽電池モジュールの現在の基準状態における電流－電圧特性曲線



(a) 機器構成の概念図



(b) 外観写真

図 3 太陽電池モジュールの屋外での電流－電圧特性曲線データ取得にもちいた機器

ジュール (U_5) と二枚のシャープ製単結晶シリコン太陽電池モジュール (U_6 , U_7) である。これら七枚の太陽電池モジュールは、後述する屋外での電流－電圧特性曲線取得の前に、ソーラーシミュレータで STC の電流－電圧特性曲線を屋内で取得している。本論文ではこれを<真値>とみなしてそれらの特性値を同表の「現在の基準状態」の欄に示している。なお、これら七枚の未知モジュールのうち、 U_4 と U_5 は未使用モジュールであり出力低下はないとみなすが、その他の五枚は、当所（茨城県つくば市）で 2004 年 4 月から約 11 年間使用した太陽電池モジュールであり、工場出荷値に対して 5.7% から 31% 程度の出力低下がある。

図 2 に、これらの太陽電池モジュールの現在の基準状態における電流－電圧特性曲線を示す。また本論文の末尾には参考としてこれらの太陽電池モジュールの EL 画像を示した。

3.1.2 屋外での電流－電圧特性曲線データの取得

図 3 に各太陽電池モジュールの屋外での電流－電圧特性曲線データ取得にもちいた機器構成の概念図とその外観写真を示す。架台には三枚の太陽電池モジュールを搭載することができ、中央には常に既知モジュール K を、その左右には未知モジュール U_n の中の任意の二枚を搭載する。これら三

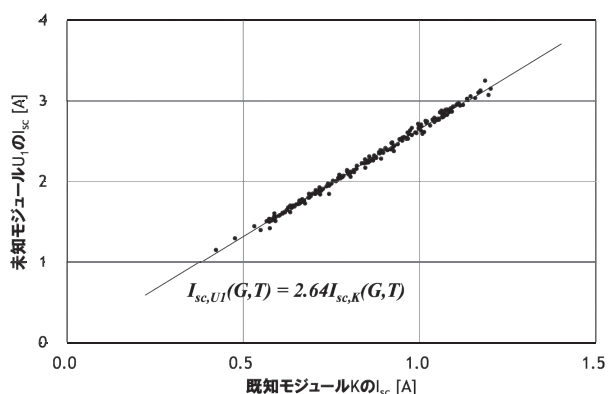
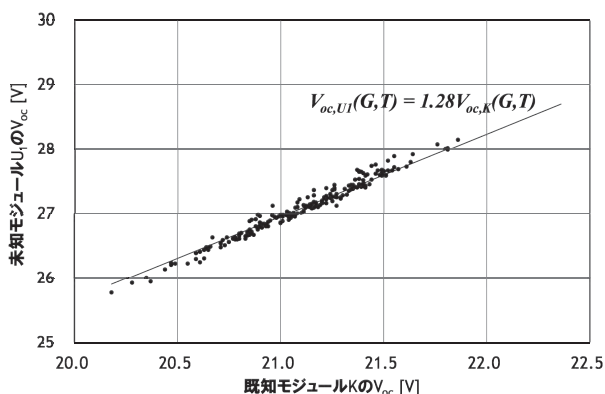
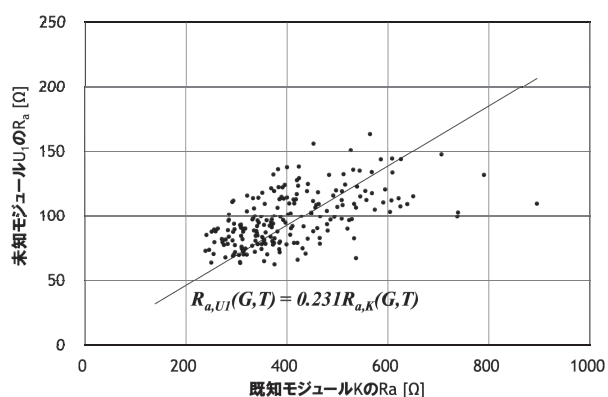
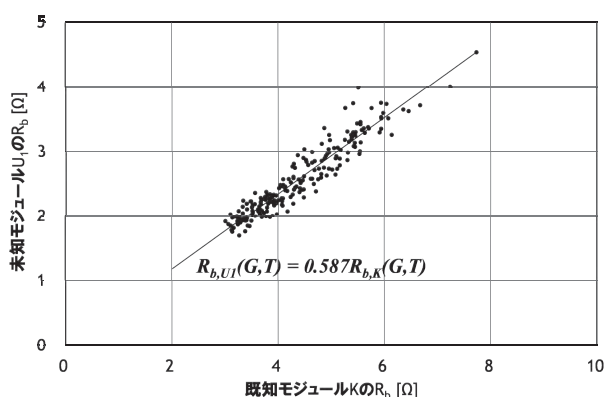
(a) $I_{sc,K}(G,T)$ と $I_{sc,U1}(G,T)$ の関係(b) $V_{oc,K}(G,T)$ と $V_{oc,U1}(G,T)$ の関係(c) $R_{a,K}(G,T)$ と $R_{a,U1}(G,T)$ の関係(d) $R_{b,K}(G,T)$ と $R_{b,U1}(G,T)$ の関係

図4 既知モジュール K と未知モジュール U₁ の $I_{sc}(G,T)$, $V_{oc}(G,T)$, $R_a(G,T)$, $R_b(G,T)$ の関係
 ($\{200 \leq G < 400$ かつ $20 \leq T_K < 30\}$ の環境領域, $\Delta T_K < |2|$ の場合. データ数=207)

枚の太陽電池モジュールにはそれぞれ電流－電圧特性曲線測定装置(日本カーネルシステム株式会社製 PVA12280)を接続し、概ね午前 8 時頃から午後 4 時頃までの時間帯に、5 分間隔で同一時刻に電流－電圧特性曲線を取得した。また、電流－電圧特性曲線取得時の環境情報として、高速応答日射計(クリマテック株式会社製 CHF-SR03)を用いた傾斜面全天日射強度および熱電対による各太陽電池モジュールの裏面温度(既知モジュール: $T_K[^\circ\text{C}]$, 未知モジュール: $T_{U1}[^\circ\text{C}]$)も併せて取得した。これ以降は、太陽電池モジュールの裏面温度を「太陽電池モジュールの温度」とみなして論考を進める。

なお、これらのデータ群の取得期間は、2014 年 11 月から 2016 年 1 月までである。

3.2 取得したデータの標本統計による仮説の立証

上記方法によって取得した既知モジュール K と未知モジュール U_n の電流－電圧特性曲線から得られた両者の $I_{sc}(G,T)$, $V_{oc}(G,T)$, $R_a(G,T)$, $R_b(G,T)$ を、 $\{200 \leq G < 400, 400 \leq G < 600, 600 \leq G < 800, G \geq 800\} \times \{20 \leq T_K < 30, 30 \leq T_K < 40, 40 \leq T_K < 50, 50 \leq T_K < 60\}$ の計十六の環境領域ごとに個々に平面上に作図し、最小二乗法によって r_i , r_v , r_a , r_b を算出した。ただし、こ

では既知モジュール K と未知モジュール U_n の温度の差 (ΔT_n) が 2°C 以上の取得データは無効とし、かつ前記環境領域のデータ数が 30 以上の領域のみを立証の対象とした。

図 4 は、一例として $\{200 \leq G < 400$ かつ $20 \leq T_K < 30\}$ の環境領域(データ数=207)における既知モジュール K と未知モジュール U₁ の $I_{sc}(G,T)$, $V_{oc}(G,T)$, $R_a(G,T)$, $R_b(G,T)$ の関係を図示したものである。この例では、 $r_i=2.64$, $r_v=1.28$, $r_a=0.231$, $r_b=0.587$ が導出され、式(11)から式(13)によって推定される未知モジュール U₁ の最大出力 $P_{max,U1,STC}(200 \leq G < 400, 20 \leq T_K < 30)$ は 155W となった。表 1 に示したようにこのモジュールの真値は 161W であるから、推定誤差は-3.73%である。

これと同様にして、各環境領域での未知モジュール U_n の推定最大出力 $P_{max,U_n,STC}(G,T_K)$ ならびに推定誤差を算出した結果を表 2 に示す。この結果から以下のことがいえる。

- (1)出力低下率の著しく大きい(31%)未知モジュール U₇ は、推定誤差の絶対値が 10%を超える環境領域が多い。したがって、仮説はこのような太陽電池モジュールに対しては成り立たない。
- (2)他方、出力低下率が 15%程度までの未知モジュール (U₁, U₂, U₃, U₄, U₅, U₆)を対象に、この仮説にもとづい

表 2 各環境領域での未知モジュール U_n の推定最大出力ならびに推定誤差 ($\Delta T_n < 2$ 、括弧内の整数は有効データ数)

G [W/m^2]	T_k [$^{\circ}C$]		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
200 ≤ G < 400	20 ≤ T_k < 30	推定値	155W(207)	155W(177)	156W(203)	187W(191)	177W(50)	118W(91)	103W(86)
		誤差	-3.73%	0.649%	1.96%	0.538%	1.72%	2.61%	11.6%
	30 ≤ T_k < 40	推定値	158W(198)	155W(239)	158W(179)	185W(231)	179W(255)	120W(178)	103W(271)
		誤差	-1.86%	0.649%	3.27%	-0.538%	2.87%	4.35%	11.6%
	40 ≤ T_k < 50	推定値	161W(146)	158W(117)	161W(136)	186W(121)	179W(99)	121W(47)	101W(57)
		誤差	0.00%	2.60%	5.23%	0.00%	2.87%	5.22%	9.43%
	50 ≤ T_k < 60	推定値	158W(40)	NA	161W(35)	NA	NA	NA	NA
		誤差	-1.86%		5.23%				
400 ≤ G < 600	20 ≤ T_k < 30	推定値	159W(185)	156W(137)	156W(99)	188W(70)	174W(42)	115W(47)	90.0W(46)
		誤差	-1.24%	1.30%	1.96%	1.08%	0.00%	0.00%	-2.49%
	30 ≤ T_k < 40	推定値	158W(226)	156W(143)	157W(183)	189W(183)	178W(114)	117W(95)	93.9W(183)
		誤差	-1.86%	1.30%	2.61%	1.61%	2.30%	1.74%	1.73%
	40 ≤ T_k < 50	推定値	162W(125)	155W(145)	160W(123)	188W(169)	178W(144)	119W(64)	93.5W(110)
		誤差	0.621%	0.649%	4.58%	1.08%	2.30%	3.48%	1.30%
	50 ≤ T_k < 60	推定値	161W(85)	156W(52)	160W(79)	187W(58)	NA	NA	NA
		誤差	0.00%	1.30%	4.58%	0.538%			
600 ≤ G < 800	20 ≤ T_k < 30	推定値	160W(120)	154W(95)	154W(38)	NA	NA	NA	NA
		誤差	-0.621%	0.00%	0.654%				
	30 ≤ T_k < 40	推定値	160W(228)	154W(159)	155W(154)	189W(180)	175W(85)	114W(104)	84.4W(143)
		誤差	-0.621%	0.00%	1.31%	1.61%	0.575%	-0.870%	-8.56%
	40 ≤ T_k < 50	推定値	159W(204)	153W(133)	156W(220)	189W(280)	177W(102)	116W(70)	86.6W(190)
		誤差	-1.24%	-0.649%	1.96%	1.61%	1.72%	0.870%	-6.18%
	50 ≤ T_k < 60	推定値	162W(146)	153W(98)	159W(147)	186W(128)	177W(34)	NA	NA
		誤差	0.621%	-0.649%	3.92%	0.00%	1.72%		
$G \geq 800$	20 ≤ T_k < 30	推定値	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		誤差							
	30 ≤ T_k < 40	推定値	160W(321)	151W(244)	154W(92)	189W(43)	NA	113W(49)	81.2W(34)
		誤差	-0.621%	-1.95%	0.654%	1.61%		-1.74%	-12.0%
	40 ≤ T_k < 50	推定値	161W(325)	151W(267)	154W(234)	188W(263)	176W(40)	115W(32)	85.0W(129)
		誤差	0.00%	-1.95%	0.654%	1.08%	1.15%	0.00%	-7.91%
	50 ≤ T_k < 60	推定値	159W(192)	150W(162)	157W(196)	186W(255)	177W(68)	116W(53)	86.1W(130)
		誤差	-1.24%	-2.60%	2.61%	0.00%	1.72%	0.870%	-6.72%

て求めた推定最大出力は、 $G \geq 400$ の環境領域においては $\pm 5\%$ の相対誤差範囲で成り立つ。

以上から、この論文の立証の範囲内においては、「出力低下率 15% 程度までの太陽電池モジュールを対象とした場合、 $G \geq 400$ かつ $20 \leq T_k < 60$ の環境領域において、推定誤差 $\pm 5\%$ の範囲内でこの仮説は成立する」と結論する。

3.3 考察

3.3.1 四要素の誤差が推定最大出力に及ぼす影響

図 4 が示すように、 $I_{sc}(G, T)$ 、 $V_{oc}(G, T)$ 、 $R_b(G, T)$ の三者に比べて $R_a(G, T)$ の分布は大きなバラつきをともなっているにもかかわらず、それらから推定される最大出力の相対誤差は 4% 程度と小さい結果となった。

そこで、この項ではこれら四要素の誤差が推定最大出力の相対誤差に及ぼす影響を考察する。

各要素が単位量だけ変化した場合の推定最大出力の変化量は、式(11)を各要素で偏微分したものとなる。すなわち、以下の式(14)から式(17)である。

$$\begin{aligned}
 & \frac{dP_{max, U, STC}}{dr_a} \\
 &= \frac{R_{a, K, STC} (r_v V_{oc, K, STC} - r_b R_{b, K, STC} r_i I_{sc, K, STC})}{(r_a R_{a, K, STC} - r_b R_{b, K, STC})^3} \times \\
 & \quad \{ (r_a R_{a, K, STC} + r_b R_{b, K, STC}) r_v V_{oc, K, STC} - \\
 & \quad 2 r_a R_{a, K, STC} r_b R_{b, K, STC} r_i I_{sc, K, STC} \} \quad \text{式(14)} \\
 & \frac{dP_{max, U, STC}}{dr_b}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{r_a R_{a,K,STC} R_{b,K,STC} (r_v V_{oc,K,STC} - r_a R_{a,K,STC} r_i I_{sc,K,STC})}{(r_a R_{a,K,STC} - r_b R_{b,K,STC})^3} \times \{ (r_a R_{a,K,STC} + r_b R_{b,K,STC}) r_i I_{sc,K,STC} - 2 r_v V_{oc,K,STC} \} \quad \text{式(15)}$$

$$\frac{dP_{max,U,STC}}{dr_i} = \frac{r_a R_{a,K,STC} I_{sc,K,STC}}{(r_a R_{a,K,STC} - r_b R_{b,K,STC})^2} \times \{ (r_a R_{a,K,STC} + r_b R_{b,K,STC}) r_v V_{oc,K,STC} - 2 r_a R_{a,K,STC} r_b R_{b,K,STC} r_i I_{sc,K,STC} \} \quad \text{式(16)}$$

$$\frac{dP_{max,U,STC}}{dr_v} = \frac{r_a R_{a,K,STC} V_{oc,K,STC}}{(r_a R_{a,K,STC} - r_b R_{b,K,STC})} \times \{ (r_a R_{a,K,STC} + r_b R_{b,K,STC}) r_i I_{sc,K,STC} - 2 r_v V_{oc,K,STC} \} \quad \text{式(17)}$$

たとえば、これらの式に既知モジュール K の四要素の真値 ($R_{a,K,STC}=103$, $R_{b,K,STC}=1.47$, $I_{sc,K,STC}=2.91$, $V_{oc,K,STC}=22.6$) および未知モジュール U₁ に関する比例定数の真値 ($r_a=0.373$, $r_b=0.578$, $r_i=2.60$, $r_v=1.28$) を代入すると、

$$\frac{dP_{max,U,STC}}{dr_a} = 28.1 \quad \frac{dP_{max,U,STC}}{dr_b} = -66.7$$

$$\frac{dP_{max,U,STC}}{dr_i} = 50.9 \quad \frac{dP_{max,U,STC}}{dr_v} = 147$$

となる。さらに、これらの値に r_a , r_b , r_i , r_v の 1/100 を乗じさらに未知モジュール U₁ の STC における最大出力 $P_{max,U,STC}$ で除すと、それらが独立に 1 パーセントだけ変化した場合の推定最大出力の変化率 $\Delta P_{max,U,STC}$ が得られる。

実際に U₁ についてこれらを計算すると、

$$\Delta P_{max,U,STC}(r_a) = 28.1 \times \frac{0.373}{100} \div 161 = 0.0652 \times 10^{-2}$$

$$\Delta P_{max,U,STC}(r_b) = -66.7 \times \frac{0.578}{100} \div 161 = -0.240 \times 10^{-2}$$

表 3 未知モジュール U_n の $\Delta P_{max,U,n,STC}(x)$

	$x=r_a$	$x=r_b$	$x=r_i$	$x=r_v$
U ₁	0.0652%	-0.240%	0.820%	1.18%
U ₂	0.0753%	-0.308%	0.773%	1.23%
U ₃	0.118%	-0.244%	0.869%	1.12%
U ₄	0.0608%	-0.217%	0.844%	1.16%
U ₅	0.0544%	-0.229%	0.816%	1.17%
U ₆	0.122%	-0.245%	0.878%	1.12%
U ₇	0.178%	-0.364%	0.813%	1.18%

$$\Delta P_{max,U,STC}(r_i) = 50.9 \times \frac{2.60}{100} \div 161 = 0.820 \times 10^{-2}$$

$$\Delta P_{max,U,STC}(r_v) = 147 \times \frac{1.28}{100} \div 161 = 1.18 \times 10^{-2}$$

となる。

これと同様にして、その他の未知モジュールの r_a , r_b , r_i , r_v の $\Delta P_{max,U,n,STC}$ を計算した結果を表 3 に示す。この表からわかるように、 r_a の誤差が推定最大出力 $P_{max,U,n,STC}$ の誤差に及ぼす影響は相対的に小さく、 r_i および r_v の 1/10 程度でしかない。

3.3.2 既知モジュールと未知モジュールの温度差が推定誤差に及ぼす影響の考察

前節では、電流－電圧特性曲線取得時の既知モジュール K と未知モジュール U_n の温度差 (ΔT_n) が 2°C 以上のデータは無効として、仮説の立証には利用しなかった。しかし、既知モジュール K と未知モジュール U_n が図 3 に示したごとくに近接していても、実際には両者に相当の ΔT_n が生じる場合がある。そして、この状況は本方法を実用に供する場合においても自然に生じる蓋然性が高い。

したがって、本方法が実用に適うか否かを判断するためには、 ΔT_n が推定最大出力の誤差に及ぼす影響について考察を加えなければならない。

そこで、この項では $\Delta T_n \geq |2|$ のデータ群のみを利用し、 $\{G \geq 400 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 60\}$ の環境領域を対象に、前節と同じ方法で U₇ を除く未知モジュール U_n の推定誤差を求めた。その結果を表 4 に示す。

表 4 各環境領域での未知モジュール U_n の推定最大出力の相対誤差 ($|2| \leq \Delta T_n < |4|$ および $\Delta T_n \geq |4|$ 、括弧内の整数は有効データ数)

G [W/m ²]	T_K [°C]	ΔT_n [°C]	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆
400 ≤ G < 600	30 ≤ T _K < 40	$ 2 \leq \Delta T_n < 4 $	-2.48%(36)	NA	1.96%(63)	NA	NA	NA
	40 ≤ T _K < 50	$ 2 \leq \Delta T_n < 4 $	NA	NA	NA	NA	2.30%(50)	2.61%(67)
600 ≤ G < 800	30 ≤ T _K < 40	$ 2 \leq \Delta T_n < 4 $	-1.86%(63)	NA	0.654%(51)	NA	1.15%(49)	NA
	40 ≤ T _K < 50	$ 2 \leq \Delta T_n < 4 $	0.621%(66)	-2.60%(31)	1.31%(120)	NA	2.30%(121)	NA
	50 ≤ T _K < 60	$ 2 \leq \Delta T_n < 4 $	NA	-1.30%(46)	NA	NA	1.15%(122)	1.74%(49)
G ≥ 800	30 ≤ T _K < 40	$ 2 \leq \Delta T_n < 4 $	-1.86%(111)	-0.649%(48)	NA	NA	NA	NA
	40 ≤ T _K < 50	$ 2 \leq \Delta T_n < 4 $	-1.24%(140)	-2.60%(40)	0.654%(168)	1.61%(92)	1.72%(100)	NA
		$\Delta T_n \geq 4 $	NA	NA	0.00%(40)	0.538%(72)	2.87%(37)	NA
	50 ≤ T _K < 60	$ 2 \leq \Delta T_n < 4 $	1.86%(56)	-3.25%(104)	1.96%(77)	0.538%(158)	1.15%(310)	0.870%(60)
		$\Delta T_n \geq 4 $	NA	NA	NA	0.00%(110)	3.45%(44)	NA

表 5 各未知モジュール U_n の各環境領域での推定最大出力の相対誤差のまとめ (括弧内の整数は有効データ数)

G [W/m^2]	未知モジュール (出力低下率)	T_K			
		$20 \leq T_K < 30$	$30 \leq T_K < 40$	$40 \leq T_K < 50$	$50 \leq T_K < 60$
$400 \leq G < 600$	U_1 (5.7%)	-1.24%(199)	-2.48%(262)	0.621%(144)	0.621%(88)
	U_2 (11%)	1.30%(146)	1.30%(157)	0.649%(162)	0.649%(65)
	U_3 (10%)	1.96%(115)	1.96%(247)	4.58%(128)	4.58%(79)
	U_4 (0.0%)	1.08%(77)	1.61%(226)	1.08%(175)	0.538%(62)
	U_5 (0.0%)	0.00%(43)	2.30%(143)	2.30%(194)	NA
	U_6 (14%)	0.00%(47)	1.74%(110)	2.61%(132)	NA
	Max{絶対値}	1.96%	2.48%	4.58%	(4.58%)
$600 \leq G < 800$	U_1 (5.7%)	-0.621%(124)	-0.621%(291)	-0.621%(270)	0.621%(163)
	U_2 (11%)	0.00%(106)	0.649%(180)	-0.649%(164)	-0.649%(144)
	U_3 (10%)	0.654%(38)	1.31%(217)	1.96%(296)	3.92%(150)
	U_4 (0.0%)	NA	1.61%(214)	1.08%(316)	0.00%(131)
	U_5 (0.0%)	NA	0.575%(134)	1.72%(224)	1.15%(159)
	U_6 (14%)	NA	-0.870%(104)	0.870%(100)	1.74%(80)
	Max{絶対値}	(0.654%)	1.61%	1.96%	3.92%
$G \geq 800$	U_1 (5.7%)	NA	-0.621%(436)	0.00%(477)	0.00%(252)
	U_2 (11%)	NA	-1.95%(293)	-1.95%(331)	-3.90%(268)
	U_3 (10%)	NA	0.654%(119)	0.654%(445)	1.96%(279)
	U_4 (0.0%)	NA	1.61%(56)	0.538%(427)	0.00%(342)
	U_5 (0.0%)	NA	0.00%(31)	1.72%(177)	1.15%(422)
	U_6 (14%)	NA	-1.74%(49)	0.00%(53)	0.870%(133)
	Max{絶対値}	NA	1.95%	1.95%	3.90%

対象とした環境領域での推定誤差は最小で-3.25%, 最大で 3.45%であり, 全体としては U_1 から U_6 のどの未知モジュールの推定誤差も $\pm 5\%$ の範囲内にあることを示している. したがって, 本検討においては既知モジュール K と未知モジュール U_n の温度に相応の差があっても前節の結論は変わらないといえる. ただし, 本検討における ΔT_n は最大で $7.60^\circ C$ であったことから, これを超える温度差が頻繁に生じている場合については本仮説の成否を言及することはできない.

3.5 本章のまとめ

前節の考察により, ΔT_n の大小は推定最大出力の誤差に影響を及ぼさないと判断した. そこで, $\Delta T_n < |2|$, $|2| \leq \Delta T_n < |4|$, $\Delta T_n \geq |4|$ のすべてのデータ群を有効と扱った場合の各環境領域での推定誤差を改めて求めた. その結果を表 5 に示す. これから標本統計のもとでは以下のことがいえるだろう.

- (1)出力低下率 15%程度までの太陽電池モジュールを対象とした場合, 次の環境領域では最大推定誤差が $\pm 3\%$ の範囲で仮説が成り立つ: $\{400 \leq G < 600 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 40\}$ または $\{G \geq 600 \text{ かつ } 30 \leq T_K < 50\}$
- (2)出力低下率 15%程度までの太陽電池モジュールを対象とした場合, 次の環境領域では最大推定誤差が $\pm 5\%$ の範囲で仮説が成り立つ: $\{G \geq 400 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 60\}$

4. ベイズ統計を利用した実用的判定方法の例示

4.1 出力低下率が 10%以下か否かの判定

前章までの結果は, 十分なデータ数が得られる場合には, この論文で提示した仮説が成り立つことを示した. しかし, 実際に屋外で太陽電池モジュールの推定最大出力を判断する場面では, より少ない測定データ数でそれを可能とできなければ, この方法に実用的な価値はない.

そこで, ここではこの論文で提案する方法とベイズ統計を組み合わせた実用的な判定方法を例示する.

具体的には, 次の問題を設定する.

ここに一枚の結晶シリコン系太陽電池モジュールがある. この太陽電池モジュールについては, 工場出荷時の STC における最大出力は既知であるが, 現在の STC における最大出力は未知である.

今, 屋外でこの太陽電池モジュールの電流-電圧特性曲線を取得し, 本方法でそれを推定した結果, 出力低下率は 10%以下となった. この太陽電池モジュールの出力低下率が実際に 10%以下である確率は何%か.

原因 H_1 および原因 H_2 を, それぞれ「この太陽電池モジュールの実際の出力低下率は 10%以下である」, 「この太陽電池モジュールの実際の出力低下率は 10%超である」とし, デ

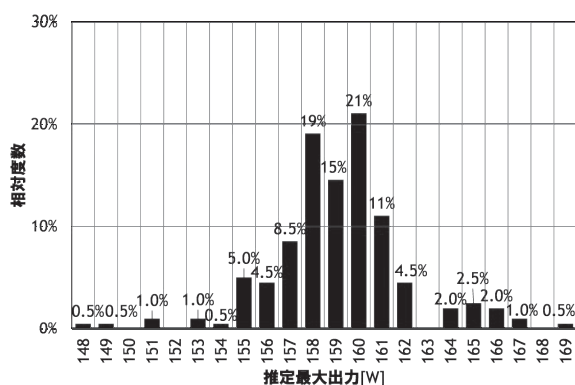


図 5 一つの取得データを用いて算出した
未知モジュール U_1 の推定最大出力の相対度数分布
($\{400 \leq G < 600$ かつ $20 \leq T_k < 30\}$ の場合)

ータ D を「この太陽電池モジュールの出力低下率が 10%以下と判定する」とすると、求めたい確率、すなわち、この太陽電池モジュールが実際に 10%以下である確率 $P(H_1|D)$ は、ベイズの展開公式を用いて以下のように表すことができる。

$$P(H_1|D) = \frac{P(D|H_1)P(H_1)}{P(D|H_1)P(H_1) + P(D|H_2)P(H_2)} \quad \text{式(18)}$$

ただし、

$P(D|H_1)$: 実際には出力低下率が 10%以下の太陽電池モジュールが、正しく 10%以下と判定される確率(尤度)

$P(D|H_2)$: 実際は出力低下率が 10%超の太陽電池モジュールが、誤って 10%以下と判定される確率(尤度)

表 6 H_1 (実際の太陽電池モジュールの出力低下率が 10%以下)の尤度

	$20 \leq T_k < 30$	$30 \leq T_k < 40$	$40 \leq T_k < 50$	$50 \leq T_k < 60$
$400 \leq G < 600$				
U_1	97.0%	96.2%	97.9%	100%
U_3	89.6%	92.7%	98.4%	100%
U_4	100%	100%	100%	100%
U_5	100%	100%	100%	NA
尤度	89.6%	92.7%	97.9%	100%
$600 \leq G < 800$				
U_1	99.2%	99.7%	100%	99.4%
U_3	76.3%	80.6%	82.4%	98.7%
U_4	NA	100%	100%	100%
U_5	NA	100%	100%	100%
尤度	76.3%	80.6%	82.4%	98.7%
$G \geq 800$				
U_1	NA	99.8%	99.8%	100%
U_3	NA	57.1%	69.6%	87.5%
U_4	NA	100%	100%	100%
U_5	NA	100%	100%	100%
尤度	NA	57.1%	69.6%	87.5%

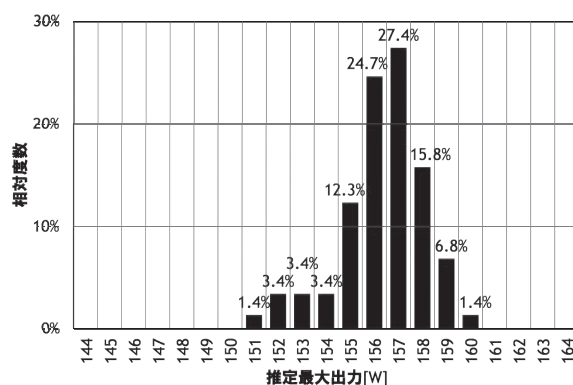


図 6 一つの取得データを用いて算出した
未知モジュール U_2 の推定最大出力の相対度数分布
($\{400 \leq G < 600$ かつ $20 \leq T_k < 30\}$ の場合)

$P(H_1)$ および $P(H_2)$: それぞれ原因 H_1 および原因 H_2 の事前確率

4.1.1 尤度の準備

図 5 は、 $\{400 \leq G < 800$ かつ $20 \leq T_k < 30\}$ の環境領域において、一つの取得データを用いて求めた未知モジュール U_1 の推定最大出力の相対度数分布を示したものである。

U_1 の工場出荷値は 171W であり現在は 161W であるから、実際の出力低下率は 5.7% (H_1 : 10%以下) である。他方、この太陽電池モジュールの出力低下率が 10%以下と判定されるのは、推定値が 154W 以上の場合である。したがって、本論文で取得したデータにもとづけば、この環境領域において「実際には出力低下率が 10%以下の太陽電池モジュール U_1 が、正しく 10%以下と判定される確率」は 97.0%である。

同様に、 H_1 (実際の太陽電池モジュールの出力低下率が 10%以下) に属する U_1 (出力低下率 5.7%), U_3 (同 10%), U_4 (同 0%) および U_5 (同 0%) に関するそれを計算した結果が表 6 である。たとえば、 $\{400 \leq G < 600$ かつ $20 \leq T_k < 30\}$ の環境領域のそれは、 U_1 が 97.0%, U_3 が 89.6%, U_4 および U_5 が 100%であるから、この環境領域においては少なくとも 89.6%の確率で「実際には出力低下率が 10%以下の太陽電池モジュールが、正しく 10%以下と判定」されることになる。したがって、この環境領域における尤度 $P(D|H_1)$ は 89.6%となる。

次に図 6 は、 $\{400 \leq G < 600$ かつ $20 \leq T_k < 30\}$ の環境領域において、一つの取得データを用いて U_2 の推定最大出力を求めた場合の相対誤差の相対度数分布を示したものである。

U_2 の工場出荷値は 173W であり現在は 154W であるから、実際の出力低下率は 11% (H_2 : 10%超) である。他方、この太陽電池モジュールの出力低下率が 10%以下と判定されるのは、推定値が 156W 以上の場合である。したがって、本論文で取得したデータにもとづけば、この環境領域において「実際は出力低下率が 10%超の太陽電池モジュール U_2 が、

表 7 H_2 (実際の太陽電池モジュールの出力低下率が 10% 超) の尤度

	$20 \leq T_K < 30$	$30 \leq T_K < 40$	$40 \leq T_K < 50$	$50 \leq T_K < 60$
$400 \leq G < 600$				
U_2	76.0%	58.0%	52.5%	48.5%
U_6	0.00%	4.67%	12.2%	NA
U_7	0.00%	0.00%	0.00%	NA
尤度	76.0%	58.0%	52.5%	48.5%
$600 \leq G < 800$				
U_2	32.1%	23.3%	14.6%	21.5%
U_6	NA	0.901%	2.00%	0.00%
U_7	NA	0.00%	0.00%	0.00%
尤度	32.1%	23.3%	14.6%	21.5%
$G \geq 800$				
U_2	NA	0.683%	0.302%	0.00%
U_6	NA	0.00%	0.00%	0.00%
U_7	NA	0.00%	0.00%	0.00%
尤度	NA	0.683%	0.302%	0.00%

誤って 10% 以下と判定される確率」は 76.0% である。

同様に、 H_2 (実際の太陽電池モジュールの出力低下率が 10% 超) に属する U_2 (出力低下率 11%), U_6 (同 14%), U_7 (同 31%) に関するそれを計算した結果が表 7 である。たとえば、 $\{400 \leq G < 600 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 30\}$ の環境領域のそれは、 U_2 が 76.0%, U_6 および U_7 が 0.00% であるから、この環境領域においては最大 76.0% の確率で「実際は出力低下率が 10% 超の太陽電池モジュールが、誤って 10% 以下と判定」される。したがって、この環境領域における尤度 $P(D|H_2)$ は 76.0% となる。

4.1.2 事前確率の準備

これで尤度は準備されたが、事後確率 $P(H_i|D)$ の計算にはさらに事前確率が必要である。しかし、この問題設定では対象とする太陽電池モジュールの出力低下率が 10% 以下か否かに関する事前の情報は与えられていない。このことは実際の場面でも同様であろう。したがって、ここでは「理由不十分の原則」(何も情報がなければ確率は同等) により、 $P(H_1) = P(H_2) = 0.5$ とする。

4.1.3 事後確率の計算

以上の準備により、この太陽電池モジュールが実際に 10% 以下である確率 $P(H_1|D)$ を算出することが可能となった。

たとえば、 $\{400 \leq G < 600 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 30\}$ の環境領域では、

$$P(D|H_1) = 0.896, P(D|H_2) = 0.760$$

$$P(H_1) = P(H_2) = 0.5$$

であるから、

$$P(H_1|D) = \frac{0.896 \cdot 0.5}{0.896 \cdot 0.5 + 0.760 \cdot 0.5} = 0.541$$

すなわち、この環境領域におけるこの太陽電池モジュールが実際に 10% 以下である確率は 54.1% である。

4.1.4 ベイズ更新

前記により、 $\{400 \leq G < 600 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 30\}$ の環境領域にお

ける一つの取得データにもとづく「判定が正しい確率」は 54.1% であり、「判定が正しくない確率」が 45.9% であることがわかった。

次に、同じ環境領域でデータを再度取得した結果 (二回目の試行)、同一の判定結果を得たとする。この判定結果が正しい確率 $P(H_1|D)_2$ は、事前確率 $P(H_1)$ および $P(H_2)$ がそれぞれ 54.1%, 45.9% であるという情報が新たに得られたため、

$$P(H_1|D)_2 = \frac{0.896 \cdot 0.541}{0.896 \cdot 0.541 + 0.760 \cdot 0.459} = 0.582$$

となり、この判定結果が一回目よりは確からしいものとなる。さらに、三回目の試行、四回目の試行でも同じ判定結果となった場合の事後確率 $P(H_1|D)_3$, $P(H_1|D)_4$ を、同様な手続きで計算すると、それぞれ 62.1%, 65.9% となり、徐々に判定結果の確からしさが改善される。

以上の手続きをすべての環境領域について行った結果を表 8 に示す。判定の正否の判断に一律の基準はないが、仮に判定者が「四回の試行後の事後確率が 90% 以上であること」を基準に設定したとすれば、この場合は、 $\{400 \leq G < 600 \text{ かつ } 40 \leq T_K < 60\}$ または $\{600 \leq G < 800 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 60\}$ または $\{G \geq 800 \text{ かつ } 30 \leq T_K < 60\}$ の環境領域で判定を正しいと判断することができる。

4.2 推定最大出力の値の確からしさの判定

表 9 は、出力低下率が 10% 以下の未知モジュール U_1 , U_3 , U_4 , U_5 について、一つの取得データを用いて求めた推定最大出力の相対誤差が $\pm 3\%$ の範囲内となった確率を示したものである。たとえば、 $\{400 \leq G < 600 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 30\}$ の環境領域では、推定最大出力の少なくとも 83.6% が相対誤差 $\pm 3\%$ の範囲内にある。この表の結果と表 7 を用いれば、前節と同様に出力低下率が 10% 以下と推定された太陽電池モジュールの

表 8 各環境領域での事後確率 ($P(H_1|D)$)。四回試行

	$20 \leq T_K < 30$	$30 \leq T_K < 40$	$40 \leq T_K < 50$	$50 \leq T_K < 60$
$400 \leq G < 600$				
1 回目	54.1%	61.5%	65.1%	67.3%
2 回目	58.2%	71.9%	77.7%	81.0%
3 回目	62.1%	80.3%	86.6%	89.8%
4 回目	65.9%	86.7%	92.4%	94.8%
$600 \leq G < 800$				
1 回目	70.4%	77.6%	84.9%	82.1%
2 回目	85.0%	92.3%	97.0%	95.5%
3 回目	93.1%	97.6%	99.4%	99.0%
4 回目	97.0%	99.3%	99.0%	99.8%
$G \geq 800$				
1 回目	NA	98.8%	99.6%	$\approx 100\%$
2 回目	NA	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$
3 回目	NA	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$
4 回目	NA	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$

表 9 出力低下率が 10%以下の未知モジュールの
推定最大出力の相対誤差が±3%の範囲内となった確率

	$20 \leq T_K < 30$	$30 \leq T_K < 40$	$40 \leq T_K < 50$	$50 \leq T_K < 60$
$400 \leq G < 600$				
U ₁	83.6%	72.9%	89.6%	96.6%
U ₃	87.8%	69.2%	21.9%	12.7%
U ₄	89.6%	88.1%	96.6%	100%
U ₅	100%	59.4%	77.3%	NA
最小値	83.6%	59.4%	21.9%	12.7%
$600 \leq G < 800$				
U ₁	96.8%	93.8%	84.4%	95.7%
U ₃	94.7%	90.8%	75.7%	20.7%
U ₄	NA	89.3%	89.2%	99.2%
U ₅	NA	88.1%	69.6%	89.9%
最小値	94.7%	88.1%	69.6%	20.7%
$G \geq 800$				
U ₁	NA	94.5%	89.7%	69.8%
U ₃	NA	96.6%	96.4%	72.0%
U ₄	NA	98.2%	95.8%	99.4%
U ₅	NA	96.8%	66.7%	84.1%
最小値	NA	94.5%	66.7%	69.8%

推定最大出力の相対誤差が±3%の範囲内にある確率を求めることができる。すなわち、前節の H_I を以下の H_I' に置き換える。

H_I' : この太陽電池モジュールの実際の出力低下率は 10%以下であり、かつ STC における最大出力を相対誤差±3%の範囲内で推定可能なモジュールである。

尤度 $P(D|H_I')$: 表 9 の各環境領域における最小値事前確率: $P(H_I')=P(H_2)=0.5$ (理由不十分の原則)

このとき、求めたい確率は、

$$P(H_I'|D) = \frac{P(D|H_I')P(H_I')}{P(D|H_I')P(H_I') + P(D|H_2)P(H_2)}$$

となる。

一例として、 $\{400 \leq G < 600 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 30\}$ の環境領域の場合について計算すると、

$$P(H_I'|D) = \frac{0.836 \cdot 0.5}{0.836 \cdot 0.5 + 0.760 \cdot 0.5} = 0.523$$

が得られる。

これと同様にして、各環境領域での四回の試行の事後確率を計算した結果が表 10 である。前節と同様に判定の成否の目安を 90%とした場合、その結果とは前節とは一部が異なり、判定が正しいと判断できる環境領域は $\{600 \leq G < 800 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 50\}$ または $\{G \geq 800 \text{ かつ } 20 \leq T_K < 60\}$ である。

5. 本手法の実践における日射強度とモジュール温度の計測の要否

本論文では冒頭から第 4 章まで、日射強度 G と既知モジュー

ール K の温度 T_K を、環境領域を区分する情報として利用してきた。しかし、現実の太陽電池モジュールの電流－電圧特性曲線測定の場合においては、それらの情報を取得するために測定対象と同一姿勢で日射計を設置したり、その裏面に熱電対を取り付けたりすることは容易ではない。また、仮に日射計や熱電対を取り付けることができたとしても、それらから得られる情報がかえって誤差を増大させる可能性もある。

本論文で提案する方法は、初期状態からの出力低下がなくかつ STC の四要素 ($I_{sc,K,STC}$, $V_{oc,K,STC}$, $R_{a,K,STC}$, $R_{b,K,STC}$) がわかっている既知モジュール K を利用する。したがって、その短絡電流 $I_{sc,K}(G, T_K)$ と開放電圧 $V_{oc,K}(G, T_K)$ は、それぞれ日射強度 G と太陽電池モジュール温度 T_K に対して線形性を有しているはずであり、そうであれば、既知モジュール K の $I_{sc,K}(G, T_K)$ と $V_{oc,K}(G, T_K)$ がそれらの代用となる。

図 7(a) は本論文のために取得した日射強度 G と既知モジュール K の短絡電流 $I_{sc,K}(G, T_K)$ をその真値で除した規格化短絡電流 $i_{sc,K}(G, T_K)$ を平面上に図示したものである (データ数: 10,866)。この図からわかるように両者はよい比例関係にある (比例定数は 0.001, $R^2=0.995$)。また、モジュール温度 T_K とは相関がみられなかった。したがって、日射計を用いて日射強度 G を取得しなくとも、既知モジュール K の $I_{sc,K}(G)$ から日射強度 G を知る事が可能である。

つぎに、図 7(b) は本検討のために取得した既知モジュール K の温度 T_K と開放電圧 $V_{oc,K}(G, T_K)$ をその真値で除した規格化開放電圧 $v_{oc,K}(G, T_K)$ を平面上に図示したものである。それぞれの日射領域で両者はよく線形性を保存している。最小二乗法で得られた近似直線は以下のとおりである。

$$v_{oc,K}(G, T_K) = -2.94 \times 10^{-3} \cdot (T_K - 25) + 0.967 \quad (400 \leq G < 600)$$

表 10 各環境領域での事後確率 ($P(H_I'|D)$)。四回試行

	$20 \leq T_K < 30$	$30 \leq T_K < 40$	$40 \leq T_K < 50$	$50 \leq T_K < 60$
$400 \leq G < 600$				
1 回目	52.3%	50.6%	29.4%	20.8%
2 回目	54.6%	51.2%	14.8%	6.42%
3 回目	56.9%	51.8%	6.77%	1.76%
4 回目	59.2%	52.4%	2.94%	0.468%
$600 \leq G < 800$				
1 回目	73.2%	79.1%	82.7%	49.1%
2 回目	88.1%	93.5%	95.8%	48.1%
3 回目	95.3%	98.2%	99.1%	47.2%
4 回目	98.2%	99.5%	99.8%	46.2%
$G \geq 800$				
1 回目	NA	99.3%	99.6%	≈100%
2 回目	NA	≈100%	≈100%	≈100%
3 回目	NA	≈100%	≈100%	≈100%
4 回目	NA	≈100%	≈100%	≈100%

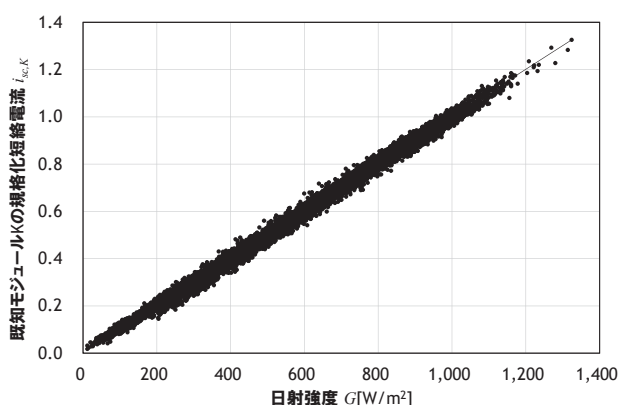
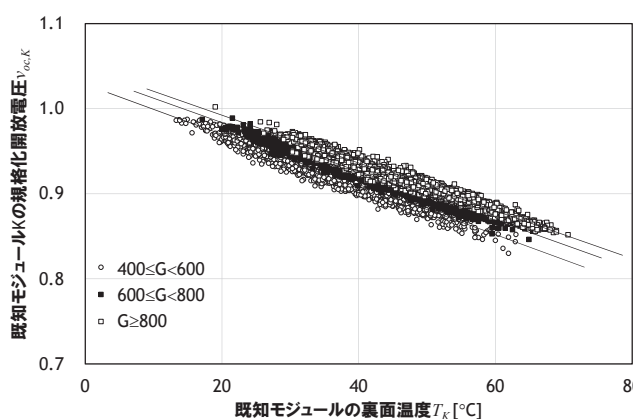
(a) 日射強度 G と規格化短絡電流 $i_{sc,K}(G, T_K)$ の関係(b) モジュール温度 T_K と規格化開放電圧 $v_{oc,K}(G, T_K)$ の関係

図 7 既知モジュール K の規格化短絡電流・規格化開放電圧と日射強度・温度の関係 (データ数: 10,866)

$$v_{oc,K}(G, T_K) = -2.86 \times 10^{-3} \cdot (T_K - 25) + 0.969 \quad (600 \leq G < 800)$$

$$v_{oc,K}(G, T_K) = -2.81 \times 10^{-3} \cdot (T_K - 25) + 0.980 \quad (G \geq 800)$$

これらの近似直線から、 T_K の係数項つまり $v_{oc,K}(G, T_K)$ の温度勾配と定数項は日射強度 G と無関係にほぼ同じであることがわかる。したがって、既知モジュール K の $V_{oc,K}(T_K)$ と温度 T_K の線形関係、つまり β (出力電圧温度係数: T_K が 1°C 変動したときの開放電圧 $V_{oc,K}(T_K)$ の変動値 [$\text{V}/^\circ\text{C}$]) が事前にわかっているならば、既知モジュール K の温度 T_K を取得しなくとも、その $V_{oc,K}(T_K)$ から既知モジュール K の温度 T_K を知る事が可能である。

6. 本論文の総括

本論文では、「屋外で取得された情報から STC における太陽電池モジュールの最大出力を判定する方法を提案し検証すること」を主題とし、仮説を立てた。

本論文で示した取得データ群のもとでは、標本統計分析の結果として、出力低下が著しい太陽電池モジュールを除けば、多少の誤差を有しつつも、一定の日射強度条件とモジュール

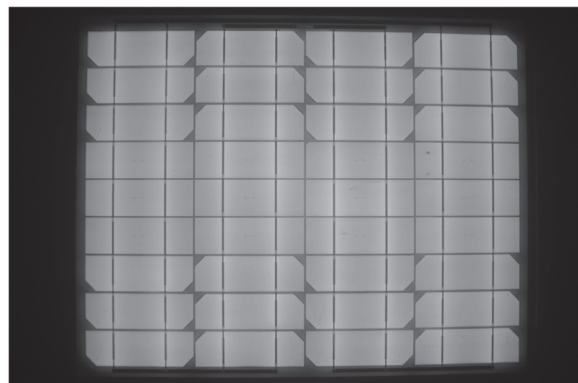
温度条件で概ね仮説が成立することが示された。また、本論文で提案する方法で用いる四要素の誤差が推定最大出力に及ぼす影響の考察から、この方法で太陽電池モジュールの STC における最大出力を推定する場合には、その電流-電圧特性曲線の取得において、最大出力電流や最大出力電圧よりも短絡電流と開放電圧をより高精度に測定する必要があることが示唆される。また、本論文での仮説の検証では、未知モジュールの型式と異なる型式の既知モジュールを用いたが、両者を同一型式とすれば推定精度が改善される可能性があると予測する。

さらに、ベイズ統計の考え方による少ない取得データ数での出力低下率や推定最大出力の確からしさの判定の方法を例示し、また、本方法によれば日射強度やモジュール温度の取得が不要となることも示した。

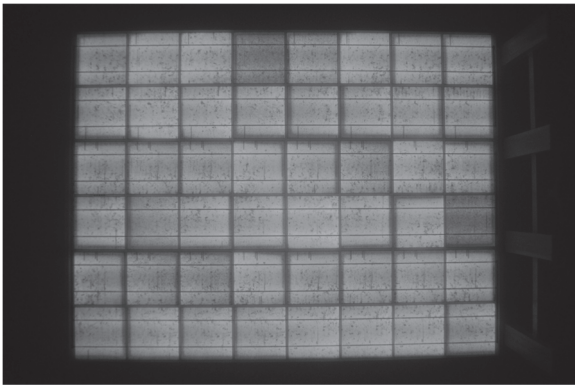
ただし、上記結論は、日本のただ一地点で取得したわずか七枚の太陽電池モジュールのデータ群の分析結果を根拠にしている。したがって、この結論は暫定的なものである。しかし、本論文で提案した方法は、太陽電池モジュールの電流-電圧特性曲線を単純に解析的に扱うものであることから、周知の等価回路式で表現することが可能な太陽電池モジュールである限りはこの方法が通用しない理由がみあたらないこと、および筆者のこれまでの経験から、周知の等価回路式で表現することができないほど出力低下が著しい太陽電池モジュールを除けば、本方法は普遍であると予見している。だが他方で、太陽電池モジュールに出力低下を起こさせる物理現象は多種多様なはずであり、われわれはその全てを知っているあるいは想像できるわけではないことを考えれば、本方法の普遍性の立証にはさらに疫学的研究を必要とする。

また、ベイズ統計を基礎におく判定方法も、この論文の時点では例示にすぎない。本方法で重要となるのは尤度の確からしさであるが、4 章で用いた尤度はあくまで本論文で取得したデータ群から求めたものであるため、その数値はやはり暫定である。したがって、この判定方法を普遍的なものとするためには、やはり疫学的研究を必要とする。

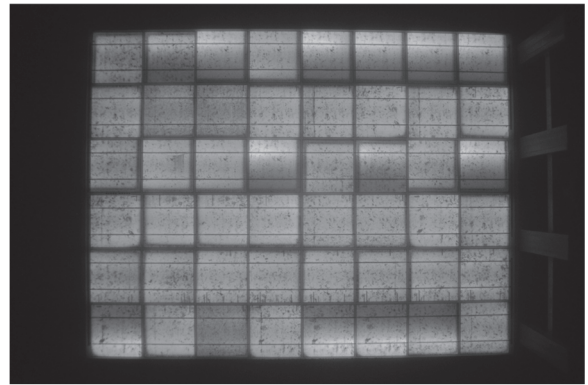
参考 各太陽電池モジュールの EL 画像



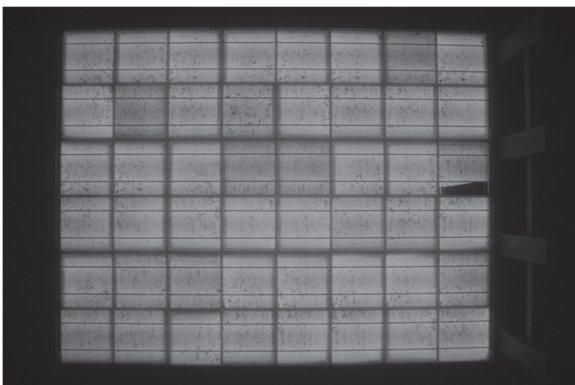
参考図 1 既知モジュール K の EL 画像



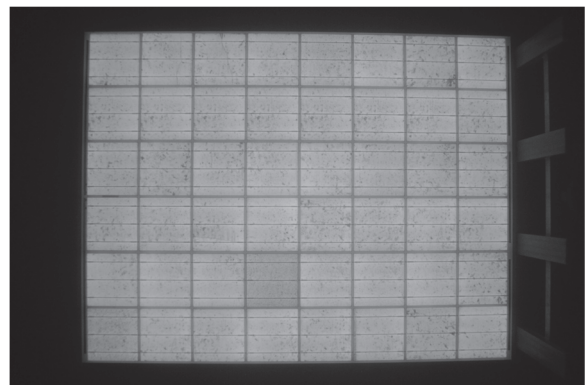
参考図 2 未知モジュール U_1 の EL 画像



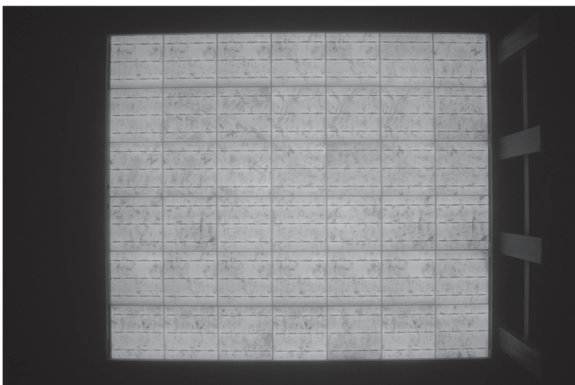
参考図 3 未知モジュール U_2 の EL 画像



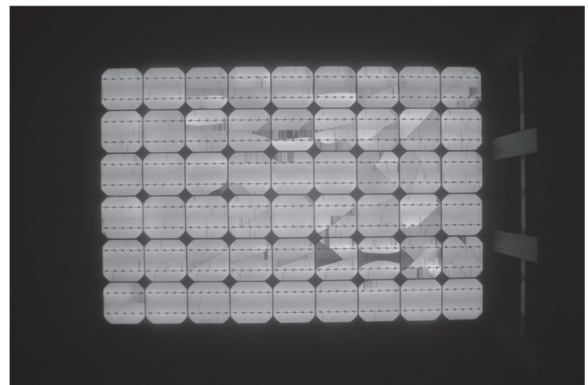
参考図 4 未知モジュール U_3 の EL 画像



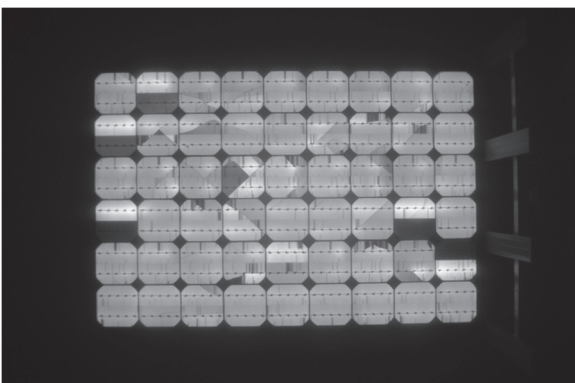
参考図 5 未知モジュール U_4 の EL 画像



参考図 6 未知モジュール U_5 の EL 画像



参考図 7 未知モジュール U_6 の EL 画像



参考図 8 未知モジュール U_7 の EL 画像