

統計的手法によるPVシステム出力解析

Analysis of PV system output with statistical method

東 麻衣子*¹ 六 川 修 一*² 清 水 浩*³ 近 藤 美 則*⁴
Maiko HIGASHI Syuuichi ROKUGAWA Hiroshi SHIMIZU Yoshinori KONDO

Abstract

With a view to clarifying the relation between the electrical output of PV system and the factors concerned with solar radiation, this paper analyzed the onsite data of poly-crystalline and mono-crystalline PV systems in Tsukuba, 1996. At first, the PV system was modeled, separating solar radiation into direct beam part and diffuse fraction. And the coefficients of the model expression were determined statistically on every season. As the results of examination, it is found that the influence of direct solar radiation on PV system output is different from that of diffuse radiation, the seasonal spectral distribution of solar radiation is concerned with the change of PV system output.

Key Words ; PV system output, Solar radiation factors, Statistical method, Season, Direct solar radiation, Diffuse radiation

1. 緒言

オンサイト出力は、気象環境に関する多様な因子の影響により複雑に変動し、この影響の測定・定量的評価は困難である。出力変動の抑制は、PVシステムが本格的な普及に至る迄に解決すべき課題であろう。ここで抑制策案出の前提として、出力変動特性の把握が必要である。これには三つのステップが考えられる。即ち、適当な手法による各影響因子ー出力瞬時値関係の特定、実際の気象量・指標による影響因子の表現、各指標の変動特性の把握である。

本論文では、各影響因子ー出力瞬時値関係の特定を扱い、多様かつ不安定な気象因子の影響の実効的な表現を目的とする。従って、フィールドデータを重要と思われる因子数個の影響に関し、統計的に解析する。この手法は細部における厳密性を欠くが、概要把握に適している。

影響因子の分類は、システム設計時の出力のパラメータ算出法⁽¹⁾に詳しい。ここでの解析対象としては特に、出力への影響が直接的であり時日・気象により変動が著しい、日射に関係する因子⁽²⁾を考える。また直達光と散乱光での特性の差異を考慮し、これを分離して解析を行う。一般に、変換効率について四季・月別の検討が行われるが、ここでは区分には小季節を用いる。より特性を明確にし普遍性を持たせる意味において、気象条件の類似によるデータの分類・解析が望ましい。

但しこの場合、各区分において統計的に十分なデータ量が必要である。データとしては、今後最も普及が見込まれる系統連系型住宅用PVシステムのものをを用いた。

この季節別解析の手法および特定結果の信頼性については、本論の知見を用いて算出された出力値と実測値との誤差により評価する。ここで、出力瞬時値に対する誤差の日変化により、季節の平均的状態からのずれ(気象条件、太陽高度等による)が示される。更に詳細な検討は、他の因子の考慮および、天候別の解析により実現されると考える。

2. 研究手法

2.1 使用データ

本研究で用いたデータは、つくば市国立環境研究所内エコオフィスにおいて取得されたものである。エコオフィス屋上(北緯36° 3' 52", 東経140° 7' 22", 高度18m)には、多結晶(LA 721G201S)、単結晶(GL136)、アモルファス(UPM-880)の3種の太陽電池アレイが傾斜角23.4°, 方位角348°に設置されている。各アレイ毎に、直流発電電圧・電流、セル温度、インバータ通過後の交流電力が測定され、他の測定項目(アレイ近傍の水平面日射強度、傾斜面日射強度、外気

*1 学生会員 東京大学工学系研究科

*2 非会員 東京大学工学系研究科(〒113 文京区本郷7-3-1)

*3 非会員 慶応大学(〒255 藤沢市遠藤5322)旧国立環境研究所

*4 非会員 国立環境研究所(〒305 つくば市小野川16-2)

原稿受付 平成9年10月31日

温)とともにデータ収集装置に送られる。(図1)又、このシステムは系統に連系されており、インバータ(全て同型)容量は5kVA、電圧型電流制御方式であり、最大出力動作点の追尾を行う。

今回の解析対象は多結晶、単結晶の2種のPVシステム実測データであり、各測定項目とも30秒毎の瞬時値を用いている。表1に各種モジュールの仕様を示す。モジュールは各々、直列9並列6、直列18並列6に配列され、アレイ面積は46.3m²、45.7m²である。

解析対象期間は1996年1/1~12/31の一年間とした。

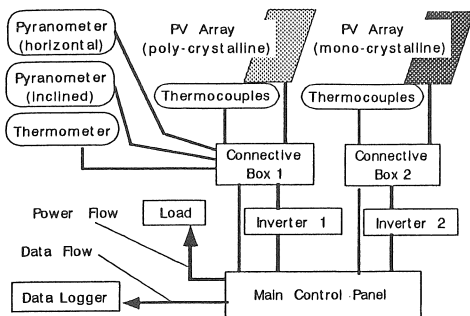


図1 PVシステム

表1 PVモジュールの諸特性

	P-Si	M-Si
P _{max} [W]	102.0	53.0
V _{pmax} [V]	33.8	17.4
I _{pmax} [A]	3.02	3.05
V _{oc} [V]	42.5	21.7
I _{sc} [A]	3.25	3.40
Area [m ²]	0.858	0.423

(日射強度1.0kW/m², A M1.5, セル温度25℃)

2.2 従来法およびPVシステムのモデル化

PV出力概算の従来法は、傾斜面日射強度にセル温度により補正した変換効率を乗ずるものである。これを次式に示す。

$$\begin{aligned}
 P &= \Phi \cdot A \cdot \eta \\
 &= \Phi \cdot A \cdot \eta_0 \{1 + a (T - 25)\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

P : PV出力(直流) [kW]
 Φ : 傾斜面日射強度 [kW/m²]
 A : アレイ面積 [m²]
 η : 変換効率
 η_0 : 基準状態での変換効率
 T : セル温度 [℃]
 a : 温度補正係数

η は基準状態(日射強度1kW/m² エアマス1.5, セル温度25℃)における値とする。使用したモジュールについて、 η を示す*。

$$\text{多結晶} \quad \eta = (12.957 - 0.0428 \cdot T) / 100 \quad (2)$$

$$\text{単結晶} \quad \eta = (13.860 - 0.0536 \cdot T) / 100 \quad (3)$$

実際の出力は日射, 気象, 機器特性等に係る因子の影響により, (1)式から大幅にずれる。ここでは, 日射因子の影響を表すため係数 β (日射有効利用度)を導入する。オンサイト変換効率は(2), (3)式から変化せず, 発電に寄与する日射強度の割合が変化すると仮定している。この β に Φ を乗じ, 発電への有効日射強度とする。ここで, 最大電力点からのずれや直並列アンバランスによる出力損失は考慮しない。ただし回路損失については考慮する。(4)式)

$$\begin{aligned}
 P &= \Phi \cdot \beta \cdot A \cdot \eta_0 \{1 + a (T - 25)\} - L \\
 &= \Phi_e \cdot A \cdot \eta_0 \{1 + a (T - 25)\} - L \quad (4)
 \end{aligned}$$

β : 有効利用度
 L : 回路損失 [kW]
 Φ_e : 有効日射強度 [kW/m²]

更に, 日射強度を直達成分と散乱成分に分け(反射成分は微小なため無視), (5)式の様に, 異なる β をとるものとする(以降, 添字d, bは各々散乱, 直達日射を意味する)。

$$\begin{aligned}
 \Phi_e &= \Phi_b \cdot \beta_b + \Phi_d \cdot \beta_d \quad (5) \\
 \Phi_b, \Phi_d &: \text{直達, 散乱日射強度 [kW/m}^2\text{]} \\
 \beta_b, \beta_d &: \text{有効直達, 散乱日射利用度}
 \end{aligned}$$

回路損失としては, 配線の抵抗と逆流防止ダイオードによる損失を考慮し, 次式で示す**

< PV~接続箱 >

$$\text{多結晶} \quad L = (0.0534 \cdot I^2 + 0.9 \cdot I) / 1000 \quad (6)$$

$$\text{単結晶} \quad L = (0.0801 \cdot I^2 + 0.9 \cdot I) / 1000 \quad (7)$$

< 接続箱~インバータ >

$$\begin{aligned}
 L &= 0.0335 \cdot I^2 / 1000 \quad (8) \\
 I &: \text{直流(アレイ)電流 [A]}
 \end{aligned}$$

ここで I は, ほぼ日射強度に比例することから次式で求める。

$$\begin{aligned}
 I &= \alpha \cdot \Phi_e \quad (9) \\
 \alpha &: \text{係数 [Am}^2\text{/kW]}
 \end{aligned}$$

以上は直流出力についてである。最終的な交流出力は(10)式で示される様に, 直流出力値の関数であると仮定する。

$$\begin{aligned}
 P_a &= f(P) \quad (10) \\
 P_a &: \text{PV出力(交流) [kW]}
 \end{aligned}$$

* 製造メーカーにおいて取得された技術資料による
 ** カタログ値と実際の配線長による

2.3 季節区分

季節区分には気圧配置の特色により年間を12分割した, 小季節⁽³⁾を用いる. 表2にその特色, および対応する実測データ期間を示す. この対応期間は, 季節がある境界日を境として段階的に移行する(木村1963)⁽⁴⁾との考えから, 気圧配置パターン⁽³⁾(天気図⁽⁵⁾)と日最高・最低気温グラフより境界相当日を推定し, その中間の適当な日数をとるものとする. 境界日の決定例を図2に示す.

小季節の内, データ取得状況および気象状況により, 晩夏, 晩秋の該当データが僅かなため解析対象から外す. また対応期間内においても土, 日, 祝日(インバータの保護動作による一時的な電力低下が頻繁), その他欠測日は除く. 結果, 解析対象は全365日中176日となる.

表2 各季節の特色および対応期間

期 (Season)	期間 (Period) 1996	特徴 (Character)
冬 Winter	1/5~2/16	西高東低の気圧配置にほぼ一週間毎に低気圧通過
早春 Early Spring	2/26~4/1	西高東低の気圧配置に移動性高気圧出現
春 Spring	4/9~5/7	移動性高気圧と低気圧が交互に通過
初夏 Early Summer	5/14~6/6	移動性高気圧が带状になり晴天が続く
梅雨 Rainy Season	6/10~7/11	梅雨前線が停滞
夏 Summer	7/19~7/30	南高北低の気圧配置 梅雨前線は宗谷海峡付近
盛夏 Midsummer	8/5~8/11	〃〃 梅雨前線は樺太付近に北上
晩夏 Late Summer		〃〃 梅雨前線は宗谷海峡付近に南下
秋りん Rainy Season	8/28~9/27	秋雨前線が日本南岸に停滞 台風も頻繁
秋 Autumn	10/2~11/22	前線南下 移動性高気圧による好天
晩秋 Late Autumn		移動性高気圧と低気圧が交互に通過
初冬 Early Winter	12/9~12/27	一時的に西高東低の気圧配置が出現

3. 係数の定式化

2.2節の各式において下線部分が未知である. これらは影響因子の関数であり, 因子の値を x , 各算出値を y とすると, 十分なデータ量の代入による両者の回帰曲(直)線で近似される. この回帰関数の選定は R^2 値の比較により行い, 2.3節の季節区分毎にこれを求める.

3.1 β への影響因子

β には, カバーガラス透過率, 分光分布, 日射強度, モジュールの汚れ, 劣化, 日影等, 多様な因子が関係する. 本論文ではこの中, 現段階での計測項目および手法の限界により, 季節毎の平均的なスペクトル分布値の変化, カバーガラス透過率および日射強度(低日射時)

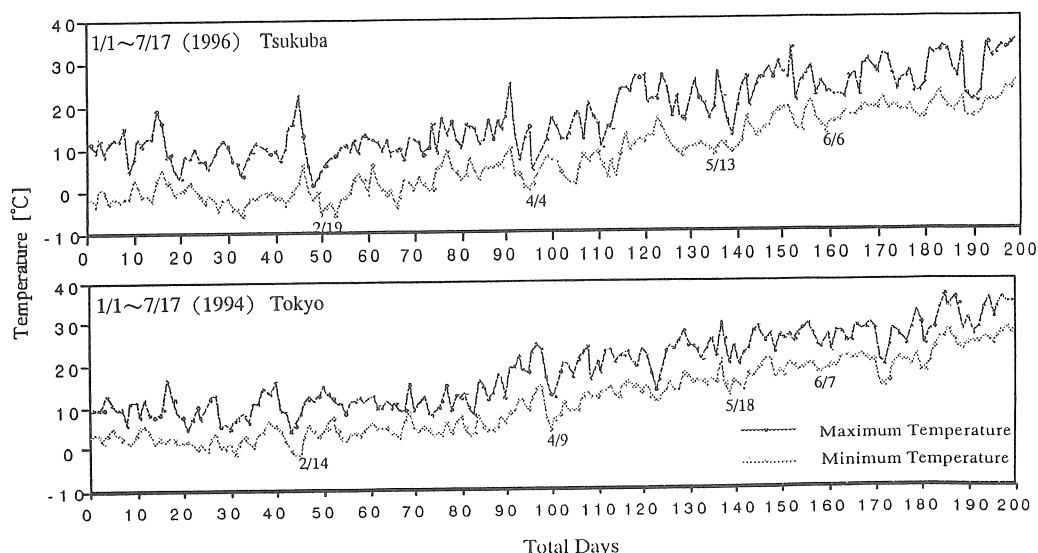


図2 境界日の決定例

を解析対象とする。また日影については、既に影の生成が確認されている場合を解析対象から外す。ここで、カバーガラス透過率は主に光入射角に依存し、また日射強度によって光電変換への寄与度が変化すると考えられることから、 $\beta_{b,d}$ を(11)式の様に分解することを考える。各係数の特定は β_1 、 β_2 、 β_3 の順で行い、 β_2 は一定、 β_3 を $\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \Phi$ の関数とする。

$$\beta_{b,d} = \beta_{1b,d} \cdot \beta_{2b,d} \cdot \beta_{3b,d} \quad (11)$$

β_1 : カバーガラス透過率
 β_2 : 季節の平均的分光分布に関する係数
 β_3 : 光強度に関する係数

3.2 β の定式化

直達光と散乱光において、 β は異なるとした。直達日射強度が測定項目にないため、実測全日射強度の直散分離を行う。これにはIEAの方法⁽⁶⁾を用いた。以後、直達日射強度 Φ_d には算出値を用い、散乱日射強度 Φ_s は実測傾斜面日射強度からこれを減じたものとする。

まず、日中常時存在する散乱光の β_d を求める。 β_d を晴天時、曇天時とも同様と仮定し(実際には異なる)、この特定には日射が散乱成分のみ(算出直達日射強度=0)の場合を抽出して用いる。

(4)式への実測値の代入により、 Φ_s を求める。次に(5)式において、 $\Phi_b=0$ より $\Phi_d=\Phi$ から $\beta_d=\Phi_s/\Phi$ で与えられる。実際に Φ に対し Φ_s をプロットすると、ほぼ原点を通る直線上に載る。前述の(11)式に基づき、より詳細な β_d の分解を考える。図3、4にそれぞれ直達光入射角度 θ ⁽⁷⁾、散乱日射強度 Φ_d に対する β_d を示す(一例として梅雨期6/10)。ここで散乱光入射角は特定されないため、暫定的に直達光入射角度を用いた。散乱日射は晴天時に太陽周辺光が多いが、完全な曇天時には入射角に特定の傾向は有しない。

図3、4より β_{1d} 、 β_{3d} とも緩やかなカーブを描いて θ の減少、 Φ_d の増加に伴い増加し、それぞれ $\theta \leq 50^\circ$ 、 $\Phi_d \geq 0.25 \text{ kW/m}^2$ で一定値(β_{3d} では1)をとると仮定す

る。この知見に基づき、梅雨期全該当データを4領域に分類する。

- | | |
|--|-----|
| $\theta \leq 50$ かつ $\Phi_d < 0.25$ | i |
| $\theta \leq 50$ かつ $\Phi_d \geq 0.25$ | ii |
| $\theta > 50$ かつ $\Phi_d < 0.25$ | iii |
| $\theta > 50$ かつ $\Phi_d \geq 0.25$ | iv |

領域ivでは、 β_d は θ 変化の影響のみを受け、両者の回帰曲線により β_{1d} が得られる。

実際には、領域ivに相当するデータは僅少であり回帰式の信頼性が低い。このため領域iiを暫定的に用い、ここで得た $\theta - \beta_d$ 回帰式を β_{1d}' とする。同時に、領域iiについて θ の影響を除去すると、 β_{2d} は補正後の Φ_d に対する補正後の β_d (一定値)として与えられる。この場合、補正に β_{1d}' を用いるため当然 $\beta_{2d}=1$ である。よって、他の季節においてもこの β_{1d}' (梅雨期)を用い、 β_{2d} は梅雨期との相対的な値とする。

次に、領域iの Φ_d 、 β_d を $\beta_{1d}' \cdot \beta_{2d}$ で補正し、 β_{3d} (対数関数)を得る。最後に、 β_{1d}' の改良のため領域ii、iiiで θ と、 $\beta_{2d} \cdot \beta_{3d}$ による β_d 補正值との回帰式を得、これを β_{1d} (二次関数)とする。

直達光の β_b において、 β_{1b} は図5に示す*。 β_{2b} および β_{3b} は散乱光と等しいと仮定し、その誤差は係数 Γ により補正する。((12)式)

$$\beta_d = \Gamma \cdot \beta_{1b} \cdot \beta_{2d} \cdot \beta_{3d} \quad (12)$$

この Γ は、上式と β_b 、 Φ_d 、 β_d を代入した(5)式との連立により求めた各 Γ 値を $\beta_{1b} \cdot \beta_{2d} \cdot \beta_{3d} \cdot \Phi_d$ の関数と仮定し、期全データによる回帰直線で特定する。

他の季節も同様の方法で処理を行う。

3.3 α および関数 f の定式化

α を(4)式による Φ_s を(9)式に代入し、セル温度 T の関数として近似する。(これは温度によって効率が変化することを受ける)

直交流出力 P と交流出力 P_a の線形回帰直線の R^2 値は1.00となる。関数 f として、これ((13)式)を用いる。

* 製造メーカーにおいて取得された技術資料による

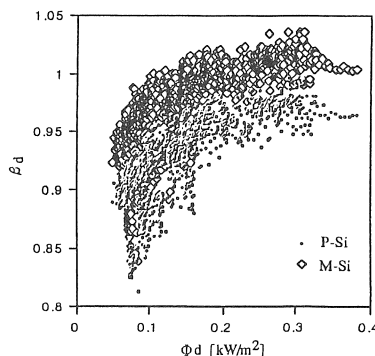
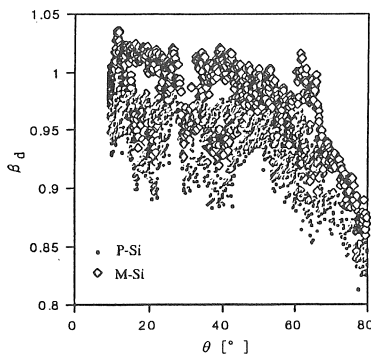


図4 散乱日射強度に対する有効利用度(散乱光)

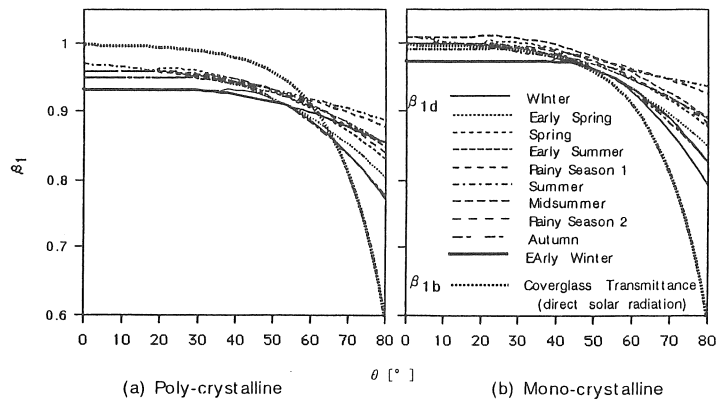


図5 直達光入射角 - β_1

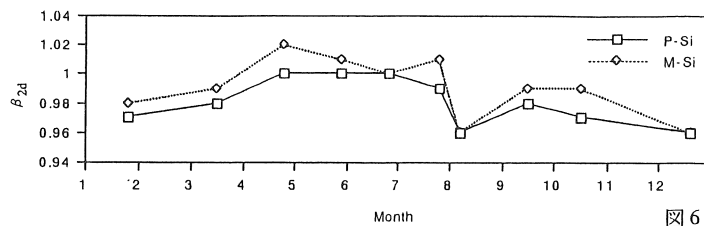


図6 β_{2d} の季節変化

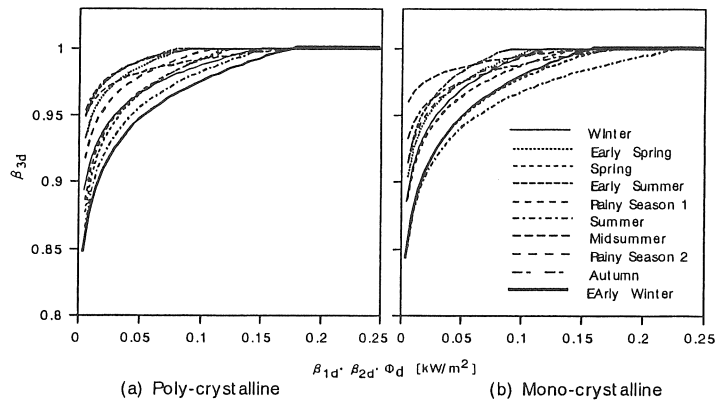


図7 日射強度 - β_{3d}

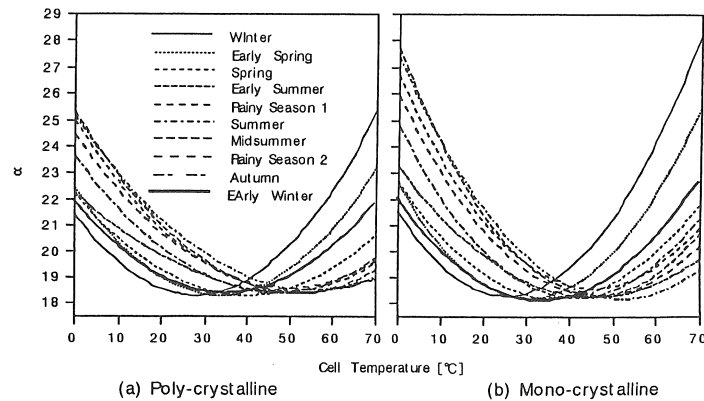


図8 セル温度 - α

4. 解析結果

4.1 係数の特定結果

多結晶・単結晶PVシステムについて、各近似式を季節毎に求めた結果から、 β_1 、 β_{2d} 、 β_{3d} 、 α について示す(図5~8)。

3.1で β_1 は、主に散乱光のカバーガラス透過性を表すものとした。図5において、 β_{1d} は β_{1b} に比べ緩やかなカーブを示す。但し、各季節の β_{1d} は算出方法(3.2)より、主にミー散乱による散乱光の平均的透過特性を示す。季節間で入射角が大きい場合(朝、夕)について比較すると、夏季に高く冬季に低い傾向が多結晶・単結晶ともに見られるが、これは完全に分離されていない他の因子の影響と考えられる。

β_{2d} については多結晶、単結晶とも、夏に高く冬に低い傾向がある。これは、以下の事象と合致する。即ち、一般に大気中の水蒸気量は夏に増加し、エアマスは冬に増大する。水蒸気は主に $0.7\mu\text{m}$ 以上の長波長成分を吸収し、大気分子等による散乱は短波長程強い。ここで、多結晶、単結晶のスペクトル応答関数との関係から、同日射強度でも長波長成分の割合の低下により変換効率は上昇する。⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 盛夏期の値が外れているが、これは該当日数が少なく、回帰式に十分なデータが得られなかった為と思われる。

β_{3d} により低日射時ほど有効利用度は低い。季節間では、分布域の相似から大きな変化は無いと推定されるが、季節毎に低日射(ミー散乱光)時の平均的分光分布を反映すると思われる。

多結晶と単結晶の特性を比較する。図5において各季節とも、単結晶(b)の β_{1d} は多結晶(a)の β_{1d} をy軸方向に平行移動したものとなり、その差は一定部分において $0.04\sim 0.05$ である。 β_{1d} が主としてカバーガラス透過率を示すならば、この差は0に近い筈であり、従って単結晶 β_{1d} への他の因子の影響が考えられる。(3)式による効率を実際には数%高い可能性が大きい。 β_2 および β_3 の傾向はほぼ一致する。これは、両者の分光応

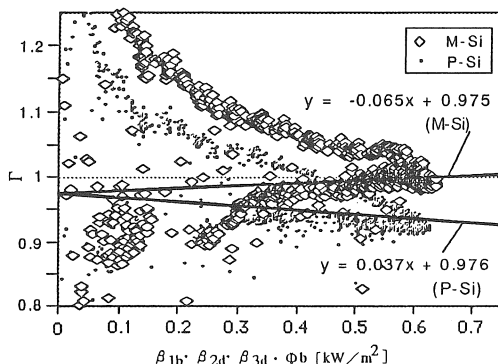


図9 Γ 特定式(夏期)と Γ 値(7/19)

および β_3 の傾向はほぼ一致する。これは、両者の分光応答特性に大差が無いこと⁽¹⁰⁾を受ける。

Γ の各値はばらつきが大きく、季節的な変化より日変化が大きいと考えられる。この原因として測定誤差、直散分離時の誤差、 β_1 、 β_2 、 β_3 の特定に際する誤差、ミー散乱光とレイリー散乱光、直達光間の特性の差異(特に分光分布の変化)等が挙げられる。図9に夏期の Γ 特定式と実際の Γ 各値(7/19 快晴)を示す。このグラフで各 Γ 値は系統的に変化し、x軸の値が等しいとき Γ 値は午後比午前で大きい。実際、同日射強度・セル温度において午前の方が有効利用度は高い。この現象は、年間を通じ快晴時に顕著である。また、図9で多結晶より単結晶の Γ 値が大きい、これは β_{1b} を双方同一とした(図5)影響と考えられる。雲が存在する場合、 Γ 値は不規則に変化し多様な値をとる。

α は各季節のセル温度の代表値の推移、それに伴う効率の変化により異なる(図8)。

処理結果の比較により、関数fに季節差、個体差は殆ど存在しないとして良い。これは以下の式で示される。

$$\begin{aligned} P \leq 0.24 & \quad P a = 0 \\ 0.24 < P \leq 5.50 & \quad P a = 0.95 \cdot P - 0.23 \\ 5.50 < P & \quad P a = 5 \end{aligned} \quad (13)$$

4.2 算出-実測出力誤差

前節における各係数-日射因子関係式の推定結果を用い、実測された日射強度およびセル温度からPVシステム出力を算出、これに対応する実測出力と比較する。(図10)

誤差*の日変化には、季節の平均的状态からのずれ、3.1で考慮しなかった因子の影響が含まれる。図11は、冬季の快晴の日(2/7, 7:30~15:30 ($P a \geq 1$))の算出直流電力と実測値との誤差を多結晶、単結晶について示したものである。前出の従来法(2.2参照)による算出結果と比較すると、特に多結晶で全体的に誤差が低下し、変化の中心が0に移動している。また、日射強度が低い領域での誤差の低下が著しい。

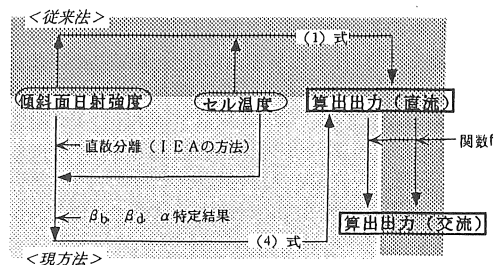


図10 出力算出フロー

* 出力の算出-実測誤差は以下の式で求める。
(誤差) = $100 \cdot \{(\text{算出値}) - (\text{実測値})\} / (\text{実測値})$

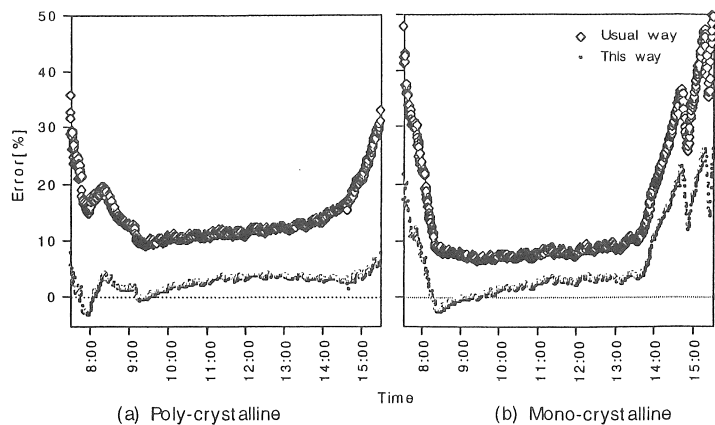


図11 算出出力(直流)誤差の日変化(冬期 2/7)

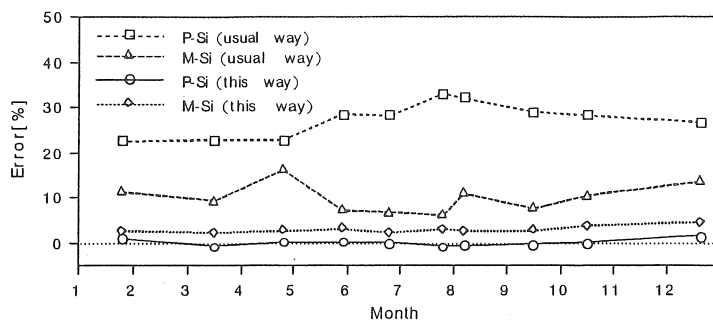


図12 算出出力(交流)積算誤差の季節変化

図11において、従来法の早朝および夕方における誤差の急激な上昇は、測定誤差の他、カバーガラス透過率の低下、分光分布変化、低日射時の効率変化等により説明される。本解析結果を用いた算法ではこの内、ガラス透過率と低日射強度による影響が抑制され、特にエアマスによる分光分布変化が大きな誤差の要因となっている。

また午前および午後の系統的な誤差変化は、係数 Γ について、出力算出に用いた回帰直線上の値と実際の値との相違によるものと考えられる。図9の参照により、昼はその差が小さく(冬期も同様)、同時に出力の算出誤差も小さい。また多結晶に比べ、単結晶の誤差が大きいことも説明される。この午前-午後間の Γ 値の相違の原因としては、セル温度とアレイ温度間の時間遅れ、分光分布の変化(パネルの設置方向がやや東向きなため、直達光入射角と太陽高度の関係が午前・午後で異なり、全日射強度における直達日射強度の割合が高度について同一にならない)等が予想される。

図11において午後に誤差が大きく、また波型になる原因は、影(避雷用ワイヤー)の生成による出力低下が、影の位置とモジュール接続方法の関係により、単結

晶において顕著なためと考えられる。

この他、日射強度が短時間で大きく変動する場合には、最適動作点からのずれが一時的に起こるため、実測出力値が低下する現象が確認される。

瞬時値について実測値-算出値間の回帰に関する検定を行い、現算法の従来法からの精度向上を確認した。ここではこの傾向を更に明確に提示するため、次に出力積算量(交流電力)についての誤差を求め、比較する。従来法の直交変換効率には(13)式を適用した。図12に季節による積算誤差の変化を示す。従来法から比べ誤差が縮小され、季節変化も抑制されたことが明瞭である。また、全データ範囲での現方法の積算誤差は、多結晶で-0.15%、単結晶で2.73%となった。これに対し、従来法での誤差は各々26.59%、8.79%である。従って、本論文におけるPVシステム出力と影響因子との関係特定結果は、実情をかなり精度良く把握したものといえる。

今後は更に、天候(気象条件)と因子の挙動について cleanliness index, diffuse index⁽¹²⁾等と関連させ、細かく検討を行う必要がある。

5. 結論

本論文では、実測データを小季節で区分し、各季節における日射因子とPVシステム出力の関係を統計的に解析した。その結果、以下の知見が得られた。

PVシステム出力変化には、直達光、散乱光の性質の相違による影響が無視出来ない。直達光、散乱光別に因子を特定する必要がある。ここでは日射因子として透過率、分光分布、低日射時における効率低下を取り上げた。これらの特定により瞬時出力の推定精度は向上し、これは積算値で見るとより明確になる。また全天日射強度のみが測定されている場合においても、計算式による直散分離は容易である。

積算誤差の低下（年間で総出力のP-Si - 0.15%, M-Si 2.73%）および季節変化の抑制により、小季節区分が適当であったといえる。またこの場合、各季節での日射因子の挙動の特色が明確になった。特に分光特性の季節変化は明らかである。この夏高冬低の傾向は他の観測結果とも一致する。また、その他の係数にも何らかの季節変化が存在する。これは特定・測定手法の限界から、他の因子の影響が分離されないことに起因する。実測等による、この影響の分離・検証が望ましい。

今後は、本論文において各因子の季節変化として捉えられた傾向が実際上有意であるか、さらに気象量・指数等での表現が可能であるかについて検証する。これは、異なる年度・地域データとの比較、解析の過程で行った種々の仮定についての実験（散乱光カバーガラス透過率の θ への依存性等）、因子相互影響の分離・新因子の検討等により行う。これらは次報において報告する。

謝辞

本論文を作成するにあたり、新菱冷熱工業株式会社関係各位に御協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

文献

- (1) 黒川浩助, 太陽光発電システムの評価・測定に関する研究, 電子技術総合研究所研究報告, 947 (1993), 32-63.
- (2) 電気学会太陽電池調査専門委員会, 太陽電池ハンドブック (1985), 208-215, コロナ社.
- (3) 根本順吉・倉嶋厚 他, 気象, 地球科学講座3 (1979), 共立出版.
- (4) 木村耕三, 季節の階段型変化について, 気象集誌, 41, (1963), 118-133.
- (5) 日本気象協会, 気象, 40.2 (1996) ~41.2 (1997).
- (6) 太陽エネルギー学会, 太陽エネルギーの基礎と応用 (1978), 30-31, オーム社.
- (7) 電気学会太陽電池調査専門委員会, 太陽電池ハンドブック (1985), 208, コロナ社.
- (8) 平田陽一・谷辰夫, 太陽光スペクトル分布を考慮した太陽電池モジュールの出力評価, 電学論 B, 113-9 (1993), 1031.
- (9) M.C.Gonzalez and J.J.Carroll, Solar Cells Efficiency Variations With Varying Atmospheric Conditions, Solar Energy, 53-5 (1994), 395-402.
- (10) 黒川浩助, 太陽光発電システム運転特性評価のための簡易分光測定に関する数値的考察, 電学論 B, 111-12 (1991), 1305.
- (11) 高橋清・浜川圭弘・後川昭雄, 太陽光発電 (1980), 113-115, 森北出版.
- (12) A.Zangvil and P.J.Lamb, Characterization Of Sky Conditions By The Use Of Solar Radiation Data, Solar Energy, 61-1 (1997), 17-22.