

# 太陽電池を複数の方位角、および傾斜角に設置した 太陽光発電アレイのシミュレーション

学生員 松川 洋 (東京農工大学)      会 員 中村 洋之 ((財)日本品質保証機構)  
会 員 杉浦 忠敏 ((財)日本品質保証機構)      会 員 黒川 浩助 (東京農工大学)  
会 員 石川 直揮 (大同ほくさん)

Simulation of Power Generating Characteristics of a Large PV Array Consisting of Plural Sub-Arrays with Different Inclination and Orientation

Hiroshi MATSUKAWA\*, Hiroyuki NAKAMURA\*\*  
Tadatoshi SUGIURA\*\*, Kousuke KUROKAWA\*  
and Naoki ISHIKAWA\*\*\*

\*Tokyo University of Agriculture and Technology  
2-24-16Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588, JAPAN  
Fax: +81-42-385-6729, E-mail: hmatsu@cc.tuat.ac.jp  
\*\*Japan Quality Assurance Organization  
\*\*\*DAIDO HOXAN INC.

## Abstract

The electrical outputs from plural sub arrays with different inclination and orientation differs each other. In such cases, total array characteristics may give a large amount of mismatch losses. For estimating these losses, a basic method of calculation has been proposed by synthesizing some I-V curves. The curves are specified by such parameters as radiation, ambient temperature, wind direction, wind speed, position of the system and so on. A total plan of this work is also suggested in this paper.

## 1.はじめに

建材一体型モジュールの開発とそれに伴ったデザインの多様化により曲面アレイを持つシステムが登場してきた。そういったシステムでは、アレイが複数の方位角を向いていたり、曲面を帯びていることがある。その場合、傾斜角または、方位角の異なるモジュールどうしを直列に配線せざるを得ないことが少なくない。モジュールの傾斜角または、方位角により、モジュール面に当たる日射強度が異なり、各々のモジュールで出力が異なる。それらを直列に繋いだ場合、それぞれの電流 - 電圧特性(I-V カーブ)の最大出力点が合わない、 $P_{max}$  ミスマッチ損失が生じる。複数の方位角、傾斜角を持つシステムでは、この損失は無視できないものになると考えられる。しかし現状では、これらの有効な解決方法となるような指針は、ほとんど考案されていない。本報告では、このようなシステムをシミュレーションしていくための方法論を提案する。また、シミュレーションの妥当性を確認するために、(財)日本品質保証機構(JQA)ソーラーテクノセンター(静岡県浜松市)において、実験も行なっている。さらに、多方位、曲面アレイの代表的な実用システムである鳳凰高校武道館サイト(鹿児島県加世田市)を対象

にした検証実験を行なう予定であり、これらの設備についても触れる。

## 2. 現状

出力の違う2枚のモジュールを直列に接続すると合成されたI-Vカーブは、図1(C)のようになる。これは、バイパスダイオードを挿入した場合であるが、I-Vカーブに段が付いていることが分かる。この場合、電力-電圧特性(P-V特性)には2つのピークがあり最大電力点追尾(MPPT: Maximum Power Point Tracking)制御も難しくなる。

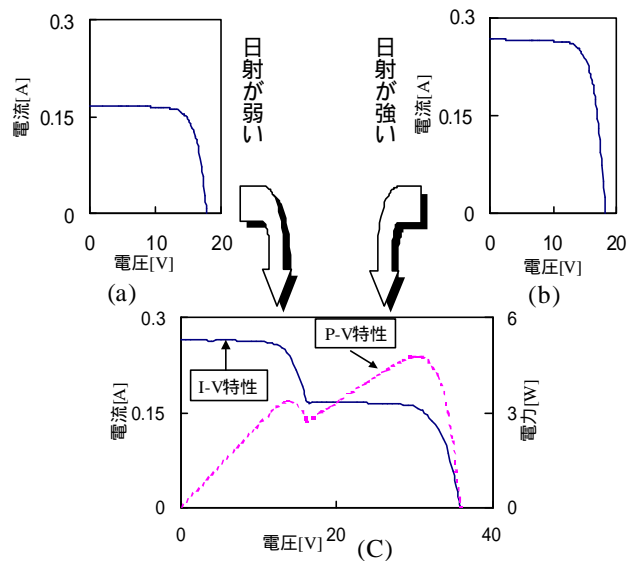


図1. 出力の違う2枚のモジュール(aとb)を直列に接続した例(c) 東向き、傾斜角50°と60°のモジュールを直列に接続、9月20日JQAソーラーテクノセンター

## 3. パラメータの定義

シミュレーションのためのパラメータ定義法を以下で示す。

### 3.1 傾斜面日射量の推定<sup>(1)</sup>

まず、水平面日射量の時積算値を、気象協会 225 地点データベース<sup>(2)</sup>または、METPV<sup>(3)</sup>(MEteorological Test data for PhotoVoltaic system)から算出する。つぎに式(1)~(4)を用いて任意面の日射量を推定する。

$$H_{AE} = H_{b\text{bg}} + H_{r\text{bg}} + H_{s\text{bg}} \quad (1)$$

$H_b$  : 直達成分  
 $H_r$  : 地面反射分  
 $H_s$  : 散乱成分  
とすると、

$$H_{b\mathbf{bg}} = \frac{(H_S - H_d) \cdot \cos \mathbf{q}}{\cos Z} \quad (2)$$

$$H_{r\mathbf{bg}} = H_S \cdot \mathbf{r}(1 - \cos \mathbf{b}) \quad (3)$$

$$H_{s\mathbf{bg}} = H_d \cdot \left[ \left\{ \frac{H_S - H_d}{H_O} \right\} \cdot \frac{\cos \mathbf{q}}{\cos Z} + \left\{ 1 - \frac{H_S - H_d}{H_O} \right\} \cdot \frac{1 + \cos \mathbf{b}}{2} \right] \quad (4)$$

$$\cos \mathbf{q} = (\sin \mathbf{f} \cdot \cos \mathbf{b} - \cos \mathbf{f} \cdot \sin \mathbf{b} \cdot \cos \mathbf{g}) \cdot \sin \mathbf{d} + (\cos \mathbf{f} \cdot \cos \mathbf{b} + \sin \mathbf{f} \cdot \sin \mathbf{b} \cdot \cos \mathbf{g}) \cdot \cos \mathbf{g} \cdot \cos \mathbf{v} + \cos \mathbf{d} \cdot \sin \mathbf{b} \cdot \sin \mathbf{g} \cdot \sin \mathbf{v} \quad (5)$$

$$\cos Z = \sin \mathbf{d} \cdot \sin \mathbf{f} + \cos \mathbf{d} \cdot \cos \mathbf{f} \cdot \cos \mathbf{v} = \sin h \quad (6)$$

ここで、

$$\mathbf{d} = \frac{180}{\mathbf{p}} \cdot \{0.006919 - 0.399912 \cdot \cos(x) + 0.070857 \cdot \sin(x) - 0.006758 \cdot \cos(2x) + 0.000908 \cdot \sin(2x)\} \quad (7)$$

$$E_t(\min) = 0.0172 + 0.4281 \cdot \cos(x) - 7.3515 \cdot \sin(x) - 3.3495 \cdot \cos(2x) - 9.3619 \cdot \sin(2x) \quad (8)$$

$$\mathbf{v} = -15 \cdot \left\{ 12.5 - T - L(\text{hour}) + 9 - \frac{E_t(\min)}{60} \right\} \quad (9)$$

$$x = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (10)$$

$H_S$  : 水平面日射量(データベースから算出)[kWhm<sup>-2</sup>]  
 $H_{AE}$  : 推定傾斜面日射量 [kWhm<sup>-2</sup>]  
 $H_d$  : 水平面散乱日射量 [kWhm<sup>-2</sup>]  
 $H_b$  : 水平面直達日射量 [kWhm<sup>-2</sup>]  
 $H_O$  : 大気外法線面直達日射量 [kWhm<sup>-2</sup>]  
 $n$  : 通し日数(1 ~ 365or366) [day]  
 $h$  : 太陽高度 [deg]  
: システム所在地点の緯度 [deg]  
、 : 太陽赤緯、太陽の時角 [deg]  
、 : 傾斜角、斜面の方位角 [deg]  
 $E_t$  : 近時差 [h]  
 $Z$  : 天頂角 [deg]

これらの式により、任意の場所、時間、傾斜角の日射量を推定することができる。

### 3.2 温度の推定

つぎに、太陽電池の温度上昇推定について、式(11)~(13)に示す<sup>(4)</sup>。

$$T_{CR} = T_A + \Delta T \quad (11)$$

において、

Open型アレイの場合

$$\Delta T = \left\{ \frac{A}{(B \cdot V^{0.8} + 1)} + 2 \right\} \cdot H_{AE} - 2 \quad (12)$$

Roof型アレイの場合

$$\Delta T = (-6.036 + 0.274 \cdot V + 0.071 \cdot V^2) + H_{AE} \cdot (45.63 - 5.91 \cdot V + 0.333 \cdot V^2) \quad (13)$$

ここで、

$V$  : 風速 [m/s]  
 $T_{CR}$  : モジュール温度 [ ]  
 $T_A$  : 気温 [ ]  
 $T$  : モジュール温度上昇 [ ]  
 $A, B$  : 定数

アレイの温度は、風やアレイの設置形態などによる冷却の影響が大きい。これにより、アレイの温度上昇の状態は、日射強度、風速、気温の関数として表すことができる。

### 3.3 各係数の温度依存性

式(14)に太陽電池の特性式を示す<sup>(5)</sup>。

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left\{ q \left( \frac{V + R_s I}{nkT} \right) \right\} - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (14)$$

ここで、

$I$  : 出力電流 [A]  
 $V$  : 出力電圧 [V]  
 $I_{ph}$  : 光起電流 [A]  
 $I_0$  : ダイオード飽和電流 [V]  
 $R_s$  : 内部直列抵抗 [Ω]  
 $q$  : 電子の電荷量 [C]  
 $n$  : ダイオード因子  
 $k$  : ボルツマン定数 [eV]  
 $T$  : セル温度 [K]  
 $R_{sh}$  : 並列抵抗 [Ω]

これらの太陽電池特性式の各係数は、下記に示すとおり温度依存性を持つ<sup>(1)</sup>。これらは、実験より算出された式である。

$$I_{ph} = I_{ph0} \left\{ 1 + 5.1029 \times 10^{-4} \cdot (T_c - 25) \right\} \quad (15)$$

$$I_0 = I_{00} \cdot \exp \{ 0.09672 \cdot (T_c - 25) \} \quad (16)$$

$$R_s = R_{s0} \left\{ \begin{array}{l} 1 + 3.3717 \times 10^{-3} \cdot (T_c - 25) \\ + 9.7058 \times 10^{-5} \cdot (T_c - 25)^2 \end{array} \right\} \quad (17)$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \left\{ \begin{array}{l} 1 + 5.7987 \times 10^{-3} \cdot (T_c - 25) \\ - 1.6129 \times 10^{-5} \cdot (T_c - 25)^2 \end{array} \right\} \quad (18)$$

ここで、

$I_{ph0}$  : 基準状態におけるモジュールの光起電流 [A]  
 $I_{00}$  : 基準状態におけるモジュールの飽和電流 [A]  
 $R_{s0}$  : 基準状態におけるモジュールの直列抵抗 [Ω]  
 $R_{sh0}$  : 基準状態におけるモジュールの並列抵抗 [Ω]  
 $T_c$  : モジュール温度 [ ]

これらの式によって、基準状態に補正することができる。

### 3.4 入射光分光分布

モジュールの方位角や傾斜角により、入射光のスペクトルも異なることが予想できる。しかし、結晶系太陽電池に限れば、積算値としては分光分布の影響はさほど大きくないことが知られている。また、分光分布を考慮するとモデルが複雑化する。そのためこのモデルにおいて、入射光分布の影響は当面取り上げないこととした。

## 4. シミュレーション

以下にシミュレーションの過程をフローチャートに示す。

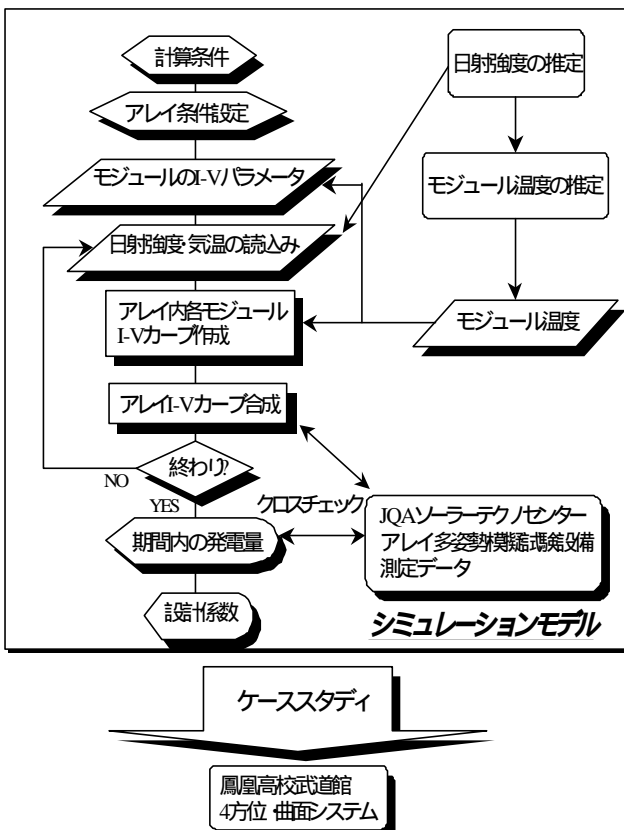


図3.シミュレーションプログラムのフローチャート

図3の手順でシミュレーションを行なう。サイトの位置情報から日射量を推定し、さらに風向、風速、アレイの設置状況を加味してアレイ温度を推定する。それぞれの係数の温度依存性を考慮しながら、I-Vカーブを作成し、合成していく。そのシミュレーション結果をアレイ多姿勢試験設備の実験データとクロスチェックする。さらに、鳳凰高校武道館システムの実験データを取得し、検証していく。

## 4.実験設備

### 4.1 アレイ多姿勢模擬試験設備

図4は、JQAソーラーテクノセンターに設置されたアレイ多姿勢模擬試験設備の概要である。図5にもあるように東西南北の4方位に加えて、南東・南西の計6方位、13枚のモジュールを任意の傾斜角にして測定する事ができる。全てのモジュールの温度測定と、日射計による日射量および、I-Vカーブの測定が可能である。

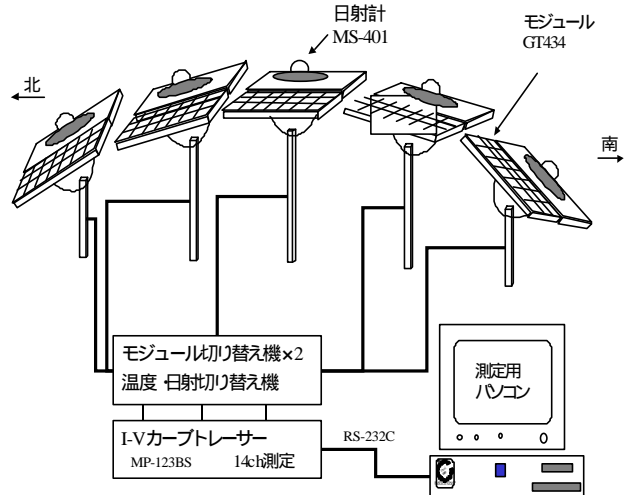


図4. JQAソーラーテクノセンター、アレイ多姿勢模擬試験設備の概要

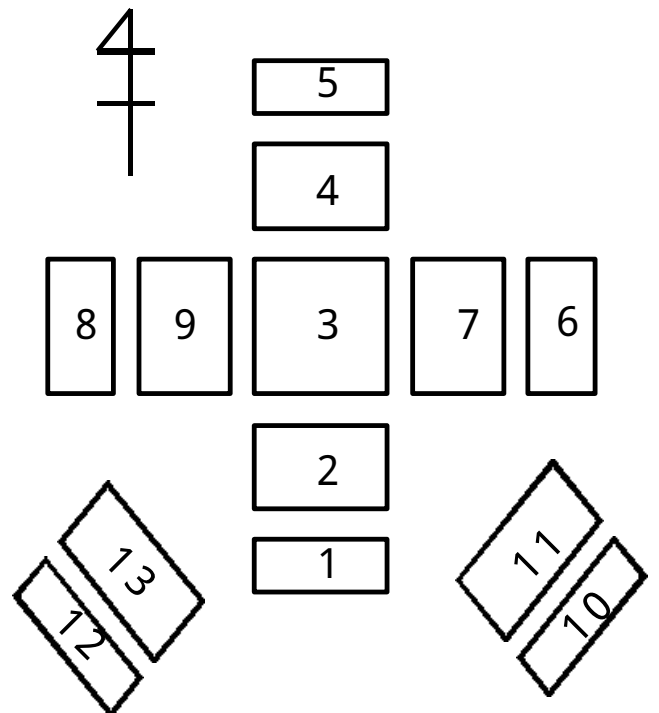


図5. JQAソーラーテクノセンター、アレイ多姿勢模擬試験設備のモジュールの配置図

表1、表2に設備の仕様を示す。

表1 試験設備の仕様

モジュール	GT434 単結晶シリコン
日射計	全天日射計 MS-401
I-V カーブトレーサー	MP-123BS モジュール 13 枚まで うち、直列 6 枚まで可 13ch+直列 1ch 1 分毎に測定
架台	0° ~ 90° まで 10° 単位で設定可能

表 2 架台の仕様

方位	番号	高さ [mm]	方位	番号	高さ [mm]
南	1	450	北	4	500
	予備	730		5	790
	2	910	南東	10	500
3	980	11		790	
東	6	500	南西	12	500
	7	790		13	790
西	8	500			
	9	790			

#### 4.2 鳳凰高校武道館システム

図 6 は上から見た鳳凰高校武道館システムの概念図である。また、システム概要を表 3 に示す。先にも述べたように、アレイが 4 方位を向いており、さらに曲面を帯びている。建材一体型のモジュールが使われており、外見は全く違和感がない。全てのストリングは(直)並列されて一つのアレイ出力として合成され 1 台のインバータに接続されている。この構成によれば、インバータの設備容量の節約になるが、本稿で述べたような  $P_{max}$  ミスマッチ損失による影響の度合いの評価も重要であり、この兼ね合いが課題である。このシステムでは、フィールドテストの実測値の評価は未だ出ていないが、このように大規模な多方位、曲面システムは世界的にもあまり例がなく、実験結果には非常に興味がある。さらに詳細な分析実験も計画していく予定である。

表 3 鳳凰高校武道館発電システムの概要<sup>(6)</sup>

太陽電池定格容量	150kW
太陽電池枚数	2,576 枚
最大出力動作電圧	285.0[V]
最大出力動作電流	542.9[A]
インバータ	屋内用系統連系 150[kW] 3 相 3 線 210[V]

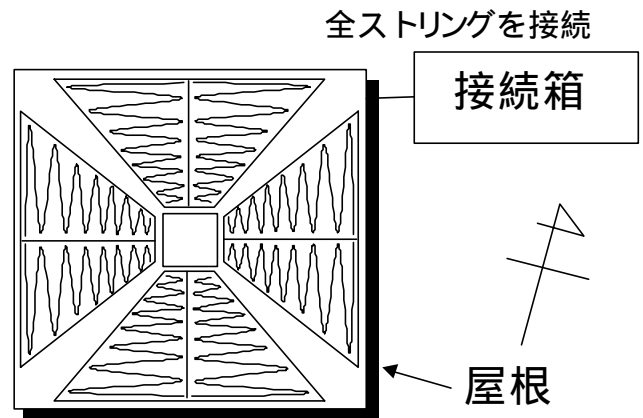


図 6 鳳凰高校武道館のシステム概念図

## 5. おわりに

今後、太陽電池の大量普及によりデザインを重視、または種々の制約条件により異平面をもつシステムが増えてくることは間違いない。このように最適傾斜角の追求が難しいシステムの設計にあたっては、電気特性推定の指針が重要になると予想される。

本論文では、複数の傾斜面、方位角をもつシステムのシミュレーション方法を提案した。このようなシステムで最適な配置を考察するには、シミュレーションが最適である。本稿で提案した方法では、日射量、風向、風速、位置データなどをパラメータとしてあらゆるシステムの I-V カーブを模擬し、合成することができる。それにより、大規模なシステムでも発電状況が予想でき、より最適な設計の指針となり得ると考えている。

## 参考文献

- (1) 杉山；「太陽光発電システムの測定及び評価に関する研究」、修士学位論文、東京農工大学、(1998)
- (2) (財)日本気象協会、「昭和 61 年太陽光発電システム実用化技術開発発電量基礎調査」、昭和 62 年
- (3) (財)日本気象協会、「太陽光発電システム実用化技術開発(研究開発管理システム部会)」、1994~1996
- (4) 湯川他；「太陽電池モジュール温度上昇の推定」電気論 B、116 巻 9 号、P1101 平成 8 年
- (5) 黒川・若松；「太陽光発電システム設計ガイドブック」、オーム社、(1994)
- (6) 西；「学校への設置例」、第 15 回太陽光発電シンポジウム予稿集、P7-21、太陽光発電懇話会、(1998)