

Output Power Decrease by Shadows of Each Cell in the Photovoltaic System Using Three-Dimensional Modules

------ 研究論文

須藤 利文*1	鈴本 聖治 ^{*1}	谷内 利明*1
Toshifumi SUTO ^{*1}	Seiji SUZUMOTO ^{*1}	Toshiaki YACHI ^{*1}

Abstract

For increasing power generation in an installation area, a photovoltaic (PV) module assembled with athree-dimensional structure has proven to be very effective. In this paper, three-dimensional photovoltaic module usingFibonacci numbers (FPM: Fibonacci Number Photovoltaic Module) was proposed to convert limited solar energy inlimited area into as much electrical energy as possible using low-cost solar cells. Power generation of FPM including theoutput power decrease by shadows of each photovoltaic cell has been estimated by the simulation.

It is shown that the power generation of a lower stage FPM decreases more than that of an upper stage FPM, especially, the power generation of the first PV cell in a second stage FPM. The Power generation of FPM is increased by expanding the distance of each PV cell. The power generation of a FPM exceeds that of a conventional planar module byincreasing the number of stages in the FPM.

キーワード:太陽光発電モジュール,3次元,影,フィボナッチ数列 Key Words : Photovoltaic Module, Three-Dimension, Shadow, Fibonacci Number

1. はじめに

現在の太陽光発電システムでは、太陽電池が高価 なため太陽電池セル当たりの発電量が最大になるよ うに、太陽光発電モジュールを南方向に傾斜を持た せて設置する.このため、太陽高度の低い朝夕など では、太陽エネルギーを有効に利用することができ ない.一方で,通信用基地局など,限られた設置面 積しか確保できない場所では、従来の太陽電池セル 当たりの発電量を最大にするモジュール構成に変え て,設置面積当たりの発電量を最大にする3次元の 太陽光発電モジュール構成が望まれる¹⁾.また、太

陽電池セルのコストは、今後量産規模の拡大や色素 増感型,有機薄膜太陽電池などの新技術開発により. 将来著しく低減されることが予想される²⁾ため, 設置面積当たりの発電量を最大にすることが有効に なる.太陽光の有効利用を図るため、植物の葉序に ならうことが考えられる³⁾.そこで,設置面積当た りの発電量を増大させることができるモジュール構 成として、植物の葉序にならってフィボナッチ数列 (1.1.2.3.5.8.13…)を用いた3次元太陽光発電モジュー ル (FPM: Fibonacci Number Photovoltaic Module) を先に提案した⁴⁾. しかし, FPM では, 鉛直下方 向にある太陽電池セルは上方向にある太陽電池セル の影がかかるため、システム設計においてはこれを 考慮して発電量を推測する必要がある.

1

本研究では、FPM を構成する太陽電池セル同士 の影をも考慮した発電量の解析モデルを明らかに

^{* 1} 東京理科大学(〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3) e-mail: j4310644@ed.tus.ac.jp (原稿受付:2011年12月20日)

し、シミュレーションによりその正確な発電特性を 求めた.

2. FPM の構成および特徴

図1に FPM の構成の一例を示す.FPM は、太 陽電池セルを植物の葉序と同じ様に順次立体に取り 付けて構成する.植物の茎を上から見た時に、二つ の葉の葉間にはある角度がある.これを開度という. 葉序はフィボナッチ数列のある項 F_n とその二つ後 の項 F_{n+2}の比で表される⁵⁾.葉序は 1/3 葉序,2/5 葉序,3/8 葉序などと表すことができ、分子は葉の 周回数を、分母は葉の枚数を表す.1/3 葉序での開 度は 360 度の 3 分の 1 の 120 度,2/5 葉序では 144 度, 3/8 葉序では 135 度となる.F_n/F_{n+2} は数が大きく なるにつれて収束し、収束値での開度 137.5 度とな る.この開度 137.5 度の葉序は最も効率よく太陽光 を受けることができるとされる.

葉序を模した FPM は以下の特徴を持つ.

- (1)太陽電池セル表面で反射した光も他の太陽電池 セルにより利用が期待できる.
- (2) 鉛直方向に何段にも太陽電池を配置できる.
- (3) 太陽電池セル同士の影の影響を考慮する必要が ある.

3. 解析モデルおよびシミュレーション方法

3.1 FPM の構成モデル

シミュレーションでは、図2に示すように1/3 葉 序 FPM を用いて1 段あたりの太陽電池セルを3枚 とし、2 段構成とした.

FPM を構成する各太陽電池セルは,直径 1mの 円形平面型太陽電池セルの 1/3 とした.1 枚目は太 陽電池セルを取り付ける支柱から見て北向き(方位 角0度)あるいは南向き(方位角 180 度)に配置し, 2 枚目以降は 1/3 葉序の開度である 120 度ずつ時計



Fig. 1 Schematic diagrams of the 3/8 Fibonacci Number photovoltaic Module (FPM) . 図 1 FPM 構成の一例 回りに回転させて配置した.太陽電池セルの傾斜角 度は支柱に太陽電池セルを取り付ける点を基準と し,地面と水平の時は0度とした.また,水平面か ら下向きに角度をつけて取り付ける時は傾斜角度を 負とし,上向きに取り付ける時は正とした.1段1 枚目の太陽電池セルの傾斜角度は,MET – PV(気 象官署:東京)の日射量データを用いた場合に,各 季節における1日の累積日射量が最大となる角度と し⁶⁾,2枚目以降は方位角との比率から傾斜角度を 設定した.

また,シミュレーションでは FPM と比較するた めに,平面型パネルを用いた従来の太陽光発電モ ジュールの発電量を算出した.表1にシミュレー ションに用いた FPM と平面型モジュールを構成す る太陽電池セルの仕様および設置場所を,表2に季 節ごとの各太陽電池セルの設置角度をそれぞれ示 す.

3.2 発電量の算出方法

FPM を構成する各太陽電池セルの影を考慮した 発電量算出フローを図3に示す.太陽電池セル同士 の影を考慮した FPM の発電量の算出には,影がか からずに発電する太陽電池セル面積を算出する必要 がある.そこで,図4に示すように,対象となる影



(b) 真南を基準とした場合

- Fig. 2 FPM with phyllotaxis pattern : 1/3 and number of stage : 2.
- 図2 1/3葉序,2段構成によるFPM

Module type	Planar module	FPM	
Number of PV cell of each stage	1	3	
Number of stage	1	2	
Form of PV cell	Circular	Sector (central angle: 120°)	
Radius of original PV cell [m]	0.5		
Installation area of the module [m ²]	0.8	1.6(0.26 × 6)	
Height of each module [m]	_	2 (one stage: 1)	
Azimuth direction	South	Rotated 120°	
Conversion efficiency[%]	10		
Installation site	Tokyo (northern latitude 35.7° east longitude 139.8°)		

Table 1	Specifi	cations	of mod	ule types.
	表1	FPM 0	の仕様	

Table 2 Angle of inclination of each PV cell. 表 2 各季節における太陽電池セルの設置角度

		Angle of inclination of each PV cell [°]			
		Spring	Summer	Fall	Winter
Planar		+40 (-40)	+8	+40	+62
FPM	First cell of the stage	+40 (-40)	+8	+40	+62
	Second cell of the stage	-40/3 (+40/3)	-8/3	-40/3	-62/3
	Third cell of the stage	-40/3 (+40/3)	-8/3	-40/3	-62/3



Fig.3 Calculation flowchart of PV cell area except shadow. 図3 発電量の算出フロー

のかかる太陽電池セルがある平面上の座標系におい て時刻ごとに影のかかり方を特定し,発電する太陽 電池セル面積を算出した.初めに,対象となる影の かかる太陽電池セルを,その太陽電池セルのある平 面上の座標系で表す.次に,太陽電池セルと同様に



Fig. 4 Influence of a shadow in a FPM system and PV cell in the coordinate system. 図4 影のかからないセル面積算出の一例

対象となる太陽電池セルにかかる影を座標系で表す ために、影の位置と形状を特定する.支柱に太陽電 池セルを取り付ける点を影の中心点とし、そこから の移動距離を算出して影の位置を特定した.また、 対象の太陽電池セルにかかる影は、元の太陽電池セ ルの形状が伸縮されて変形した形状になるため、時 刻ごとの影の伸縮率から影の形状を特定した.座標 系で表された太陽電池セルとかかる影から、積分し て影のかからない面積を算出した.

シミュレーションでは、太陽電池セルを取り付け る支柱による影の影響は考慮せず、各太陽電池セル では影のかからない部分のみで発電すると仮定し た⁷⁾.また、太陽電池セルの温度、設置場所の外気 温度など、気温による影響も考慮しないものとした. シミュレーションで考慮する太陽光の成分として は、太陽電池セル表面で反射した光等は無視した. シミュレーションには、気象条件として影の影響が 最も顕著に現れる快晴日を対象とし、方位角を指定 して得られる MET-PV の斜面日射量データを用い た⁶.

3.3 各太陽電池セルの影のかかる面積の算出方法

対象となる影のかかる太陽電池セルをその太陽電 池セルのある平面上の座標系で表す.座標系におけ る各太陽電池セルを図5に示す.

元の平面型太陽電池セルを形成する円, FPM を 構成する1枚目の太陽電池セルと2枚目の太陽電池 セルを分割する線L₁₂, 2枚目の太陽電池セルと3 枚目の太陽電池セルを分割する線 L_{23} ,1枚目の太陽電池セルと3枚目の太陽電池セルを分割する線 L_{13} をそれぞれ(1)~(4)式で表す.

$$C: x^2 + y^2 = r^2$$
(1)

$$L_{12}: f_{12}(x) = \tan 30^{\circ} \times x \quad \dots \quad \dots \quad (2)$$

 $L_{13}: f_{13}(x) = -\tan 30^{\circ} \times x$ (4)

r:元の円形平面型太陽電池セルの半径

次に,対象となる太陽電池セルにかかる影をその 太陽電池セルがある平面上の座標系で表す.支柱に 太陽電池セルを取り付ける点を影の中心点とし, *x*, *y*軸方向への中心点の移動距離を図6に示す. *x*軸 方向の中心点の移動距離を*a*, *y*軸方向の中心点の 移動距離を*b*とし,図6中の太陽高度α,太陽電池 セルの角度,太陽電池セルの設定間隔の関係からそ れぞれの軸方向の移動距離を,以下のそれぞれ (5), (6)式から算出する.

·x軸方向の移動距離

 $a |\sin\theta| + a \cos\theta \cdot \tan\alpha = h$



Fig. 5 Numerical expression of PV cell in the coordinate system.

図5 座標系における太陽電池セル





```
Journal of JSES
```

·y軸方向の移動距離

h

 $b |\sin \sigma| + b \cos \sigma \cdot \tan \beta = h$

a:x軸方向成分の太陽高度[°]

β:y軸方向成分の太陽高度[°]

θ:太陽電池セルのx軸方向成分の傾斜角度[°]

 σ:太陽電池セルの y 軸方向成分の傾斜角度[°] また,対象となる太陽電池セルでの影のかかり方 を図7に示す.影の伸縮は,各太陽電池セルの設定 角度によって影のかかり方が異なる. x 軸方向はそ れぞれ図7(a),(b)の影のかかり方があり, y 軸 方向は図7(c)の影のかかり方がある.元の太陽 電池セルの長さr,かかる影の長さr'とした場合 のx,y 軸方向の影の伸縮率 m,n は,それぞれ(7.1),





- 50 -

(7.2), (8) 式から算出する.
・図7 (a) の場合

$$m = \frac{r'}{r}\cos(\theta_1 - \theta_2) + \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\alpha + \theta_2)}$$
(7.1)

・図7 (b) の場合

·図7 (c) の場合

m:x軸方向の影の伸縮率

- n: y 軸方向の影の伸縮率
- *θ*₁:上段の太陽電池セルの傾斜角度[°]
- *θ*₂:下段の太陽電池セルの傾斜角度[°]

次に、太陽電池セルにかかる影の形状を求める. かかる影は、影をかける太陽電池セルの形状が x 軸 方向に m 倍、y 軸方向に n 倍に伸縮された形状に なる.影をかける太陽電池セルの形状が(1)~(4) 式で表される場合,(1)~(8) 式から影の形状を(9) ~(12) 式で表すことができる.

$$C':\frac{(x-ma)^2}{(mr)^2} + \frac{(y-nb)^2}{(mr)^2} = 1$$
 (9)

$$L_{12}': f_{12}'(x) = \frac{n}{m} \times \tan 30^{\circ} \times (x - ma) + nb \cdots$$
 (10)

$$L_{23}': x = 0$$
 (11)

$$L_{13}'f_{13}'(x) = -\frac{n}{m} \times \tan 30^{\circ} \times (x - ma) + nb \cdots$$
 (12)

以上から(5)~(12)式を用いて,影のかかり 方を特定し,時刻毎に積分して影のかからない面積 を算出する.



4.1 時刻ごとの発電特性

1段あたりの高さを1mとした場合のFPMと平 面型モジュールの春分における時刻ごとの発電電力 値を図8に示す.真北を基準としたFPMの発電量 は,従来の平面型の発電電力値と比較した場合,1 段では83%と少ないが,2段では149%に増加する. また,真南を基準としたFPMの場合は,1段では 69%だが,2段では137%に増加する.FPMは,鉛 直方向に段数を増加させることで,平面型のモ ジュール構成よりも設置面積当たりの発電電力値が 増加する.また,FPMを構成し,太陽電池セル同 士の影を考慮した場合は,1段では太陽高度が1日 の中で最も高くなる南中時を中心に,何れの構成に おいても発電電力値が減少する.2段では各構成法 によるセル同士の影の影響が大きくなるため,1段 のみの場合と比較して顕著な出力低下をもたらす.

4.2.1 真北を基準とした FPM の発電特性

真北を基準として構成した FPM の1段目の太陽 電池セルごとの発電電力値を図9,2段目の太陽電 池セルごとの発電電力値を図10に示す.1/3葉序, 2段で真北を基準として FPM を構成する場合,1 段目では,1枚目と2枚目の太陽電池セルには影が かからないが,3枚目の太陽電池セルには影がかか り発電電力が減少するため,12時以前の発電電力 が減少する.また,2段目では,全ての太陽電池セ ルに影がかかり,特に1枚目の太陽電池セルは影の 影響が大きいため,1段目と比較して発電電力は大 幅に減少する.



また、影の影響を定量的に評価するため、1段目



Fig. 8 Output power of the each module type at vernal equinox with distance of each stage : 1m.

- 図 8 春分の時刻ごとの発電電力 (FPM の 1 段あたりの高 さ: 1m)
- Fig. 9 Output power of a first-stage FPM based on north side.
- 図9 各太陽電池セルの時刻ごとの発電電力(北基準:1 段目)

における影を考慮しない場合に対する影を考慮した 場合の発電量の比率を図11,2段目における影を考 慮しない場合に対する影を考慮した場合の発電量の 比率を図12に示す.



Fig. 10 Output power of a second-stage FPM based on north side.

図10 各太陽電池セルの時刻ごとの発電電力(北基準:2 段目)



Fig. 11 Ratio of output power with shadow to without shadow (first-stage FPM based on north side).
 図 11 各太陽電池セルの影を考慮しない場合に対する影を





- Fig. 12 Ratio of output power with shadow to without shadow (second-stage FPM based on north side) .
- 図 12 各太陽電池セルの影を考慮しない場合に対する影を 考慮した場合の発電量の比率(北基準:2段目)

1段目では、3枚目の太陽電池セルに影がかかり、 午前中最大60%発電電力が減少する.また、2段目 では、特に1枚目の太陽電池セルが最も影の影響を 受け、最大74%発電電力が減少する.

4.2.2 真南を基準とした FPM の発電特性

真南を基準として構成した FPM の1段目の太陽 電池セルごとの発電電力値を図13,2段目の太陽電 池セルごとの発電電力値を図14に示す.真南を基 準として FPM を構成する場合は,各段の1枚目の 太陽電池セルには影がかからない.一方で,各段の 2枚目と3枚目の太陽電池セルにはいずれも影がか かり,1段目と2段目とで出力低下による発電特性 はほぼ同等である.

また,1段目における影を考慮しない場合に対す る影を考慮した場合の発電量の比率を図15,2段目 における影を考慮しない場合に対する影を考慮した 場合の発電量の比率を図16に示す.

1段目では、2、3枚目の太陽電池セルにそれぞれ



Fig. 13 Output power of a first-stage FPM based on south side.

図13 各太陽電池セルの発電電力(南基準:1段目)



- Fig. 14 Output power of a second-stage FPM based on south side.
- 図14 各太陽電池セルの発電電力(南基準:2段目)

影がかかり、2枚目の太陽電池セルは午前中最大 53%、3枚目の太陽電池セルは午後最大78%発電電 力が減少する.2段目も2、3枚目の太陽電池セル にそれぞれ影がかかり、2枚目の太陽電池セルは午 前中最大65%、3枚目の太陽電池セルは午後最大 78%発電電力が減少する.真南を基準としてFPM を構成する場合、1段目と2段目の発電特性はほぼ 同様な特性を示す.

4.3 1 段の高さを変化させた場合の FPM の発電特性

1段の高さを変化させた場合における影を考慮し ない場合に対する影を考慮した場合の発電量の比率 を図17に示す.真北を基準とした場合,1段目で は影の影響によって減少する発電電力量が少ない. 一方で,2段目では,1段目よりも影の影響を受け, 発電電力量が減少する.また,真南を基準とした場







- Fig. 16 Ratio of output power with shadow to without shadow (second-stage FPM based on south side) .
- 図16 各太陽電池セルの影を考慮しない場合に対する影を 考慮した場合の発電量の比率(南基準:2段目)

合,1段の高さが高くなると,1段目と2段目の発 電電力量はほぼ同等になる.

4.4 季節ごとの発電特性

春分,夏至,秋分,冬至において真北を基準とした FPM を構成し,影を考慮した場合の1日の累積 発電電力量を図18,各季節における影を考慮しない場合に対する影を考慮した場合の発電量の比率を 図19に示す.1年を通して FPM の発電電力量は, 太陽電池セルの影を考慮した場合でも平面型の発電 電力量よりも上回る.太陽電池セル同士の影による 出力低下を考慮した場合,春分が最も発電電力量が 多く,冬至が最も少なくなる.また,平均的に太陽 高度の高い夏至では,影の影響によって発電電力量 が減少する.

5. まとめ

FPM を用いた太陽光発電システムにおいて、太陽電池セル同士の影による出力低下をシミュレーションによって解析し、以下の結果を得た.



Fig. 17 Dependence of the FPM output power on the distance of each stage.

図17 太陽電池セルの設置間隔依存性





図 18 季節ごとの発電電力量 (FPM の1段の高さ:1m)



Fig. 19 Ratio of output power with shadow to without shadow (each season) .

図19 季節ごとの影を考慮しない場合に対する影を考慮し た場合の発電量の比率(北基準)

(1) 3次元太陽光発電モジュール(FPM)は、段数の増加や1段あたりの高さを変化させることで、 太陽電池セルの影を考慮した場合でも従来の平面型 と比較して設置面積あたりの発電電力量が上回る.

(2) 1/3 葉序,2 段構成の FPM は,1 段目よりも2 段目の方が影の影響を受け,発電電力が減少する.

(3) 1/3 葉序, 2 段構成の FPM は, 真南を基準 として太陽電池セルを構成した方が, 真北を基準と した場合よりも出力低下が大きくなる.

(4) 基準とする設置方位によって FPM の発電特 性は異なり,春分の日に真北を基準にして FPM を 構成した場合は,1段目よりも2段目の方が影によ る出力低下が大きくなるが,真南を基準とした場合 は,1段目と2段目の出力低下の割合はほとんど変 わらない.

(5)1年を通して平均的に太陽高度の高い夏至が, 最も影の影響を受け,出力低下が大きくなる.

以上により,植物の葉序を模した3次元太陽光発 電モジュール(FPM)は、太陽電池セルの影によ る出力低下を考慮しても、従来の太陽光発電モ ジュールに対して優位性があるといえる. 今後の課題としては,参考とする葉序や各太陽電 池セルの設置角度,設置間隔等を変えた異なる条件 下での構成法,さらに太陽電池セルや支柱の影によ る出力低下に関するより正確な把握などがあげられ る.こうした課題を考慮した上で,設置面積あたり の発電量を最大限にできる FPM の構造の検討が必 要だと考えられる.

謝辞

本研究は、科学研究費(基盤研究(C), No. 23560340)の補助を受けて行われた。

参考文献

- 1)秋山一也・野崎洋介・工藤満・谷内利明,ニッ ケル水素電池を搭載した通信用独立型太陽光発 電システム,信学技報(2000-07),EE2000-10,
- 2) NEDO : http://www.nedo.go.jp/informations/ other/161005_1/161005_1.html, (2010)
- 3) S.Obara and I.Tanno and T.Shiratori, Lightreceivingcharacteristics of a distributed solar module with a plant shootconfiguration, proceedings of 34th Renewable Energy, Volume 34,Issue 5, (2009), pp.1210-1226
- Y. Asai and T. Yachi , A Novel Photovoltaic Module AssembledThree-Dimensionally, proceedings of 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, No.708 (2010) , Honolulu
- 5) 岩永恭雄・松井講介訳(R.A.Dunlap 著), 黄金 比とフィボナッチ数(2005), pp.121-127, 日本 評論社
- 6) NEDO: http://www.nedo.go.jp/library/shiryou. html, (2010)
- 7)加納・金内・小林・谷内,太陽電池モジュール の庇型設置における影の影響,電気学会研究会 資料,FTE-07-18 (2007),pp.87-92