

3次元モジュールを用いた 太陽光発電システムの影による出力低下

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

須藤 利文*¹
Toshifumi SUTO¹

鈴木 聖治*¹
Seiji SUZUMOTO¹

谷内 利明*¹
Toshiaki YACHI¹

Abstract

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

本研究では、FPMを構成する太陽電池セル同士の影響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られ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

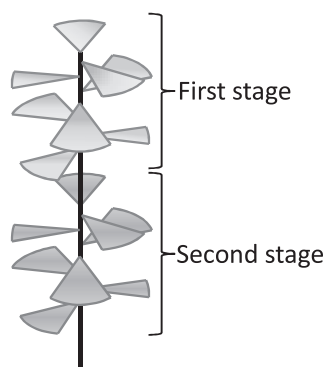


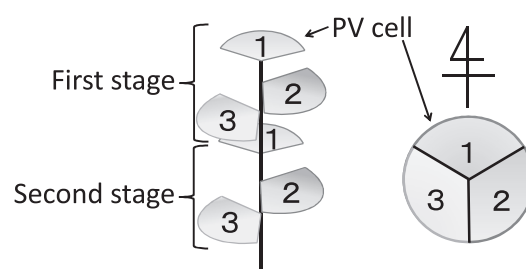
Fig. 1 Schematic diagrams of the 3/8 Fibonacci Number photovoltaic Module (FPM).
図1 FPM構成の一例

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。

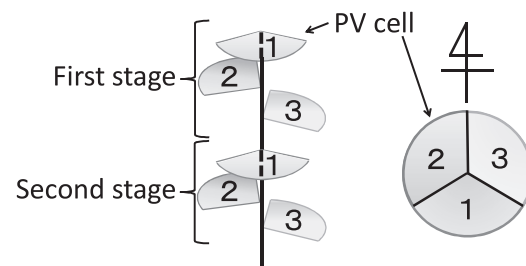
また、シミュレーションではFPMと比較するために、平面型パネルを用いた従来の太陽光発電モジュールの発電量を算出した。表1にシミュレーションに用いたFPMと平面型モジュールを構成する太陽電池セルの仕様および設置場所を、表2に季節ごとの各太陽電池セルの設置角度をそれぞれ示す。

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



(a) Northern pattern.
(a) 真北を基準とした場合



(b) Southern pattern.
(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

Table 1 Specifications of module types.
表1 FPMの仕様

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 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

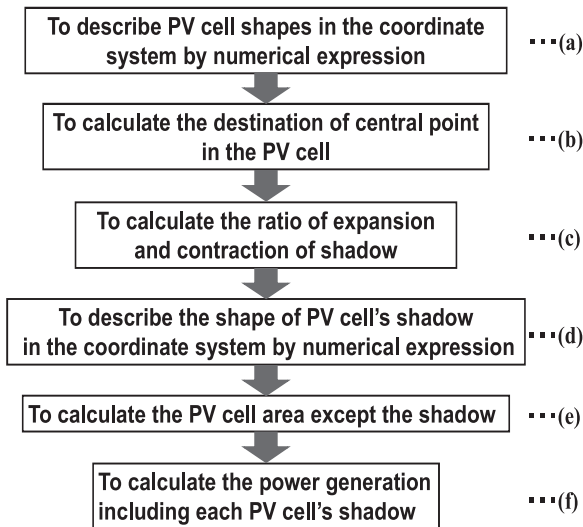


Fig. 3 Calculation flowchart of PV cell area except shadow.

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

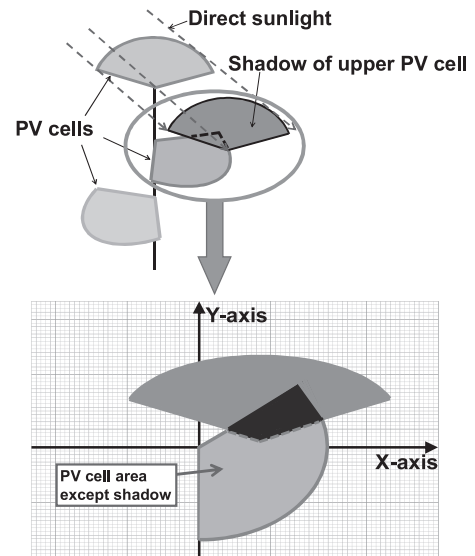


Fig. 4 Influence of a shadow in a FPM system and PV cell in the coordinate system.

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のかかる影から、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.

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

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

$$L_{23}: x = 0 \dots\dots\dots (3)$$

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

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

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

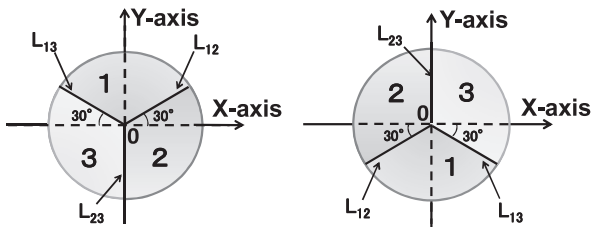


Fig. 5 Numerical expression of PV cell in the coordinate system.

図5 座標系における太陽電池セル

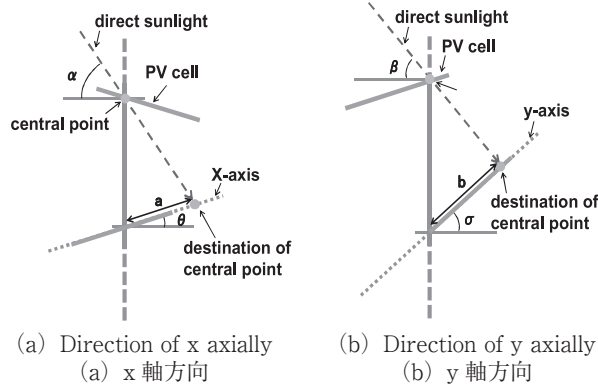


Fig. 6 Schematic diagrams to calculate the destination of central point in the PV cell.

図6 影の中心点の移動距離

$$\therefore a = \frac{h}{\cos\theta \cdot \tan\alpha + |\sin\theta|} \dots\dots\dots (5)$$

・ y 軸方向の移動距離

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

$$\therefore b = \frac{h}{\cos\sigma \cdot \tan\beta + |\sin\sigma|} \dots\dots\dots (6)$$

h : 太陽電池セルの間隔 [m]

α : x 軸方向成分の太陽高度 [$^\circ$]

β : y 軸方向成分の太陽高度 [$^\circ$]

θ : 太陽電池セルの x 軸方向成分の傾斜角度 [$^\circ$]

σ : 太陽電池セルの y 軸方向成分の傾斜角度 [$^\circ$]

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り. 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),

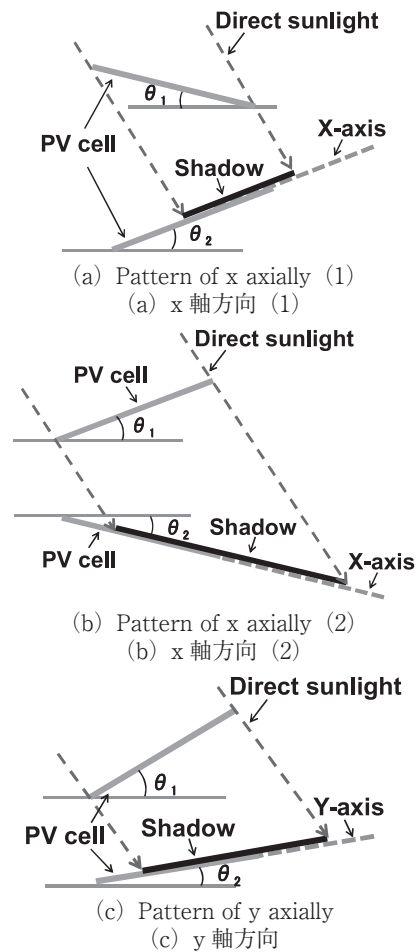


Fig. 7 Schematic diagrams to calculate the ratio of expansion and contraction of shadow.

図7 影の伸縮率

(7.2), (8) 式から算出する.

・ 図 7 (a) の場合

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

・ 図 7 (b) の場合

$$m = \frac{r'}{r} \cos(\theta_1 - \theta_2) + \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\alpha - \theta_2)} \dots\dots\dots (7.2)$$

・ 図 7 (c) の場合

$$n = \frac{r'}{r} \cos(\theta_1 + \theta_2) + \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\tan(\beta + \theta_2)} \dots\dots\dots (8)$$

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.

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

$$L'_{12}: f'_{12}(x) = \frac{n}{m} \times \tan 30^\circ \times (x - ma) + nb \dots (10)$$

$$L'_{23}: x = 0 \dots\dots\dots (11)$$

$$L'_{13}: f'_{13}(x) = -\frac{n}{m} \times \tan 30^\circ \times (x - ma) + nb \dots (12)$$

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.

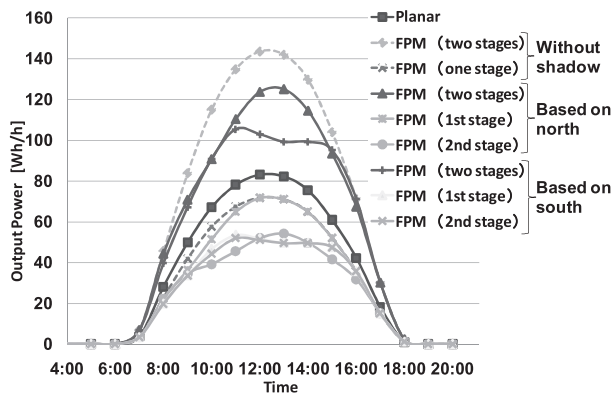


Fig. 8 Output power of the each module type at vernal equinox with distance of each stage : 1m.

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)

4. シミュレーション結果

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

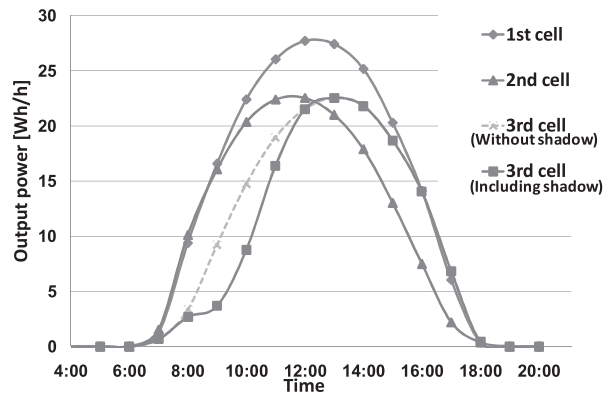


Fig. 9 Output power of a first-stage FPM based on north side.

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段階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。

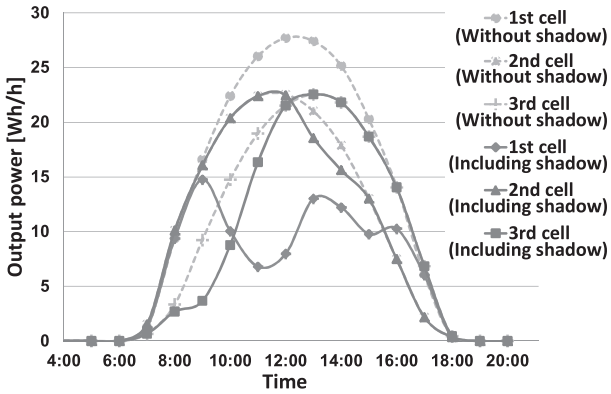


Fig. 10 Output power of a second-stage FPM based on north side.
 図10 各太陽電池セルの時刻ごとの発電電力（北基準：2段階目）

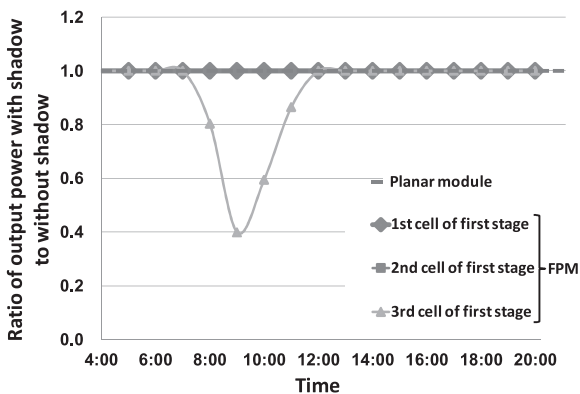


Fig. 11 Ratio of output power with shadow to without shadow (first-stage FPM based on north side).
 図11 各太陽電池セルの影を考慮しない場合に対する影を考慮した場合の発電量の比率（北基準：1段階目）

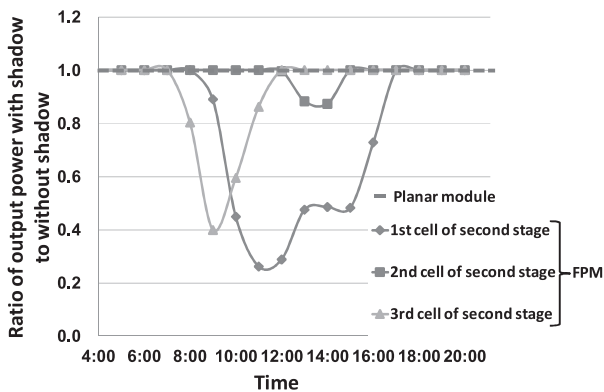


Fig. 12 Ratio of output power with shadow to without shadow (second-stage FPM based on north side).
 図12 各太陽電池セルの影を考慮しない場合に対する影を考慮した場合の発電量の比率（北基準：2段階目）

1段階目では、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段階目では、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段階目の太陽電池セルごとの発電電力値を図13、2段階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段階目と2段階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段階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段階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段階目では、2、3枚目の太陽電池セルにそれぞれ

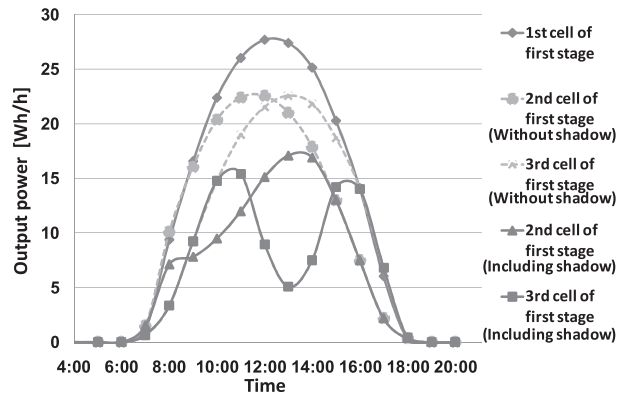


Fig. 13 Output power of a first-stage FPM based on south side.
 図13 各太陽電池セルの発電電力（南基準：1段階目）

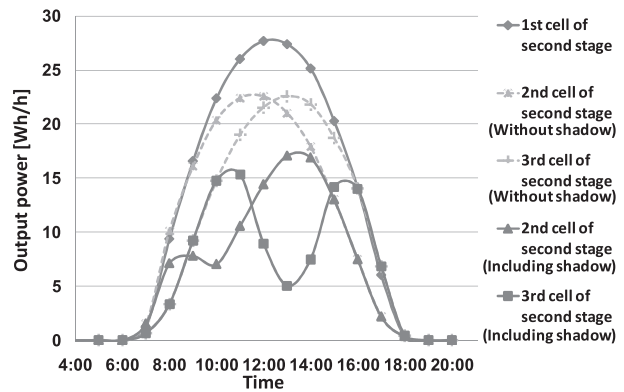


Fig. 14 Output power of a second-stage FPM based on south side.
 図14 各太陽電池セルの発電電力（南基準：2段階目）

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

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。

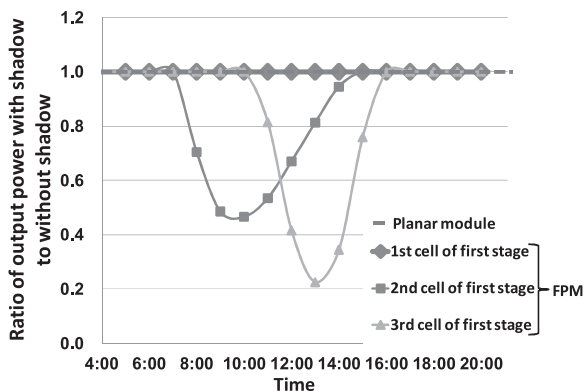


Fig. 15 Ratio of output power with shadow to without shadow (first-stage FPM based on south side).
 図15 各太陽電池セルの影を考慮しない場合に対する影を考慮した場合の発電量の比率 (南基準：1段目)

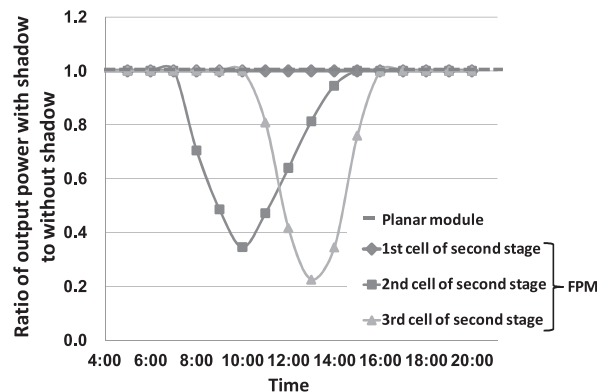


Fig. 16 Ratio of output power with shadow to without shadow (second-stage FPM based on south side).
 図16 各太陽電池セルの影を考慮しない場合に対する影を考慮した場合の発電量の比率 (南基準：2段目)

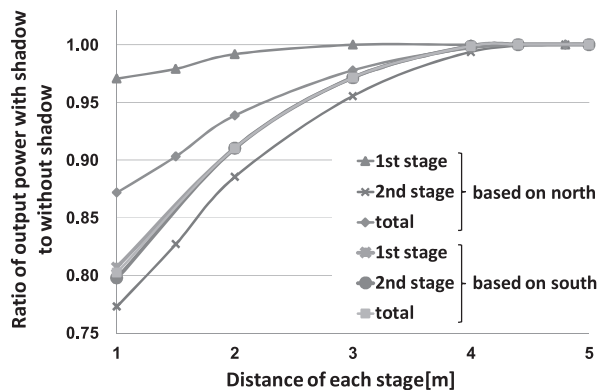


Fig. 17 Dependence of the FPM output power on the distance of each stage.

図17 太陽電池セルの設置間隔依存性

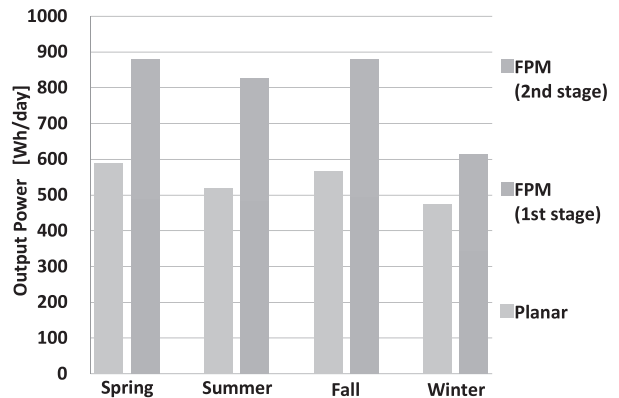


Fig. 18 Output power of the FPM during each season with distance of each stage : 1m.

図18 季節ごとの発電電力量 (FPMの1段の高さ：1m)

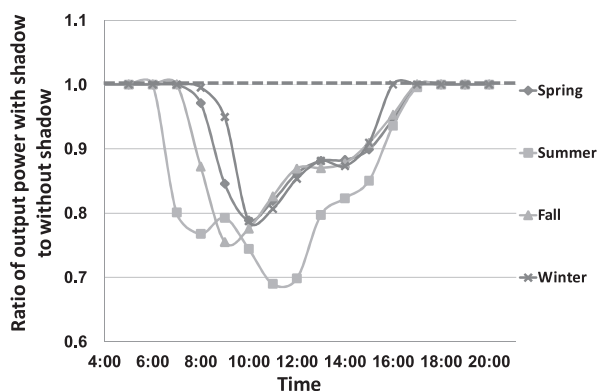


Fig. 19 Ratio of output power with shadow to without shadow (each season) .

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、春分の日我真北を基準にして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, Light-receiving characteristics of a distributed solar module with a plant shoot configuration, proceedings of 34th Renewable Energy, Volume 34, Issue 5, (2009), pp.1210-1226
- 4) Y. Asai and T. Yachi, A Novel Photovoltaic Module Assembled Three-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/shiryout.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