

フィボナッチ数列構成による 三次元太陽光発電モジュールの特性 － 1/3 葉序 2 段構成疑似 FPM －

Output Power Characteristics of Three-Dimensional Photovoltaic Module Using Fibonacci Numbers -1/3-phyllotaxis with 2-stage quasi FPM-

鈴木聖治^{*1}
Seiji SUZUMOTO

谷内利明^{*1}
Toshiaki YACHI

Abstract

In recent years, energy demand is increasing from the global increase in population. The shift to renewable energy from a fossil fuel is expected under these circumstances. Installing photovoltaic in the roof of a house is expected as a dispersed-type power source familiar to a life. Three -dimensional photovoltaic module using Fibonacci numbers (FPM) has been proposed in order to improve production of electricity in an installation area. In this study, quasi FPM using single crystal solar cells has been manufactured and it has been measured their output power characteristic.

It is shown that, as compared with the conventional planar type PV module, quasi FPM obtains the 1.42 times production of electricity in the installation area by increasing the number of the stages in the FPM. Quasi FPM is arranging each PV cell towards a different direction, and can use insolation efficiently also in the morning and evening when a solar altitude is low. Output power simulation value and an experimental value are in agreement with 9 % of difference at fine day.

キーワード : 太陽光発電モジュール、3 次元、葉序、影、Fibonacci Number Photovoltaic Module (FPM)

Key words : Photovoltaic module, three-dimension, phyllotaxis, shadow

1. はじめに

近年、自然エネルギーの利用に対する期待が増しており、特に太陽光発電は、(1) 太陽のエネルギーが無尽蔵である、(2) 発電時に CO₂ を排出しない、(3) 分散型電源に適している等から注目されている。2012 年 7 月の再生可能エネルギー固定価格買取制度施行以降、我国において太陽光発電システムの指数関数的な導入が進み、現在その設備量は原子炉 7 基分にも達している¹⁾。この急激な導入量の増

大は太陽電池価格の予想以上の低減ももたらしている。

太陽光発電では、日射量を最大限利用することが重要であるが、日射量は太陽高度により左右され、太陽電池セル当たりの発電量を最大とする従来の平面型パネルを用いた太陽光発電モジュールでは、太陽高度の低い朝夕には著しく日射量の利用が制限される。そこで、太陽電池価格の低減に合わせて太陽電池セル当たりの発電量を最大にする従来の平面型モジュール構成から、朝夕を含めて設置面積当たりの太陽光エネルギーを、より効率的に利用する構成が期待される。著者たちは先に植物の葉序を模したフィボナッチ数列(1,1,2,3,5,8,13...)に基づいた 3 次元太陽光発電

^{*1} 東京理科大学 (〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)
e-mail: j4312636@ed.tus.ac.jp
(原稿受付: 2013 年 11 月 5 日)

モジュール(FPM: Fibonacci Number Photovoltaic Module)を提案した²⁾。計算機シミュレーションによって、3次元太陽光発電モジュール(FPM)では、段数の増加や1段あたりの高さを変化させることで、従来の平面型モジュールと比較して発電量が增大することが示された³⁾。本研究ではFPMの実際の発電特性を把握するため、単結晶シリコン太陽電池を用いた1/3葉序2段構成疑似FPMを製作し、その発電特性を明らかにした。

2. FPMの構造及び特徴

図1に1/3葉序2段構成FPMの模式図を示す。FPMはフィボナッチ数列に基づく植物の葉を模倣した太陽光発電モジュールである。太陽電池セルは植物の葉の様に配置され、植物の葉の付き方を葉序といい、隣り合う葉と葉の間の角度は開度という。多くの植物の葉序はフィボナッチ数列のある項 F_n とその2つ後の項 F_{n+2} との比によって決まる⁴⁾。 F_n は周回数を、 F_{n+2} は葉の枚数を示す。1/3葉序における開度は $360^\circ \times 1/3$ で 120° 、3/8葉序では $360^\circ \times 3/8$ で 135° となる。植物の葉に降り注ぐ太陽光を最大限有効に利用できる開度は 137.5° とされている。FPMでは支柱を中心にして扇形の太陽電池単セルを、開度ごとに回転しながら下向きに時計回りに配置される。植物の葉序を模倣したFPMは次のような特徴がある²⁾。

- (a)配置する太陽電池セルの数を鉛直方向に増加させることにより設置面積あたりの発電量の増大が期待できる。
- (b)太陽電池セル表面で反射した光も他の太陽電池セルで利用できる。
- (c)FPMを構成する太陽電池セル同士の影や支柱による影の影響を考慮する必要がある。
- (d)太陽電池セルごとに日射量が異なるため、太陽電池セルごとに最大出力点で動作させる必要がある。

図2にFPMのシステムブロック図を示す。FPMを構成する各太陽電池セルは設置方位や影の影響によって発電特性が異なる。太陽電池セル間のミスマッチを防ぐためにそれぞれの太陽電池セルをMPPTによって制御し⁵⁾、それらを並列化することでシステムを構成することを想定している。

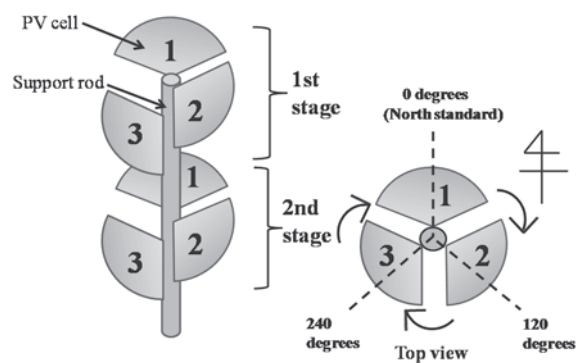


Fig. 1: Schematic diagram of a 1/3-phyllotaxis with 2-stage FPM (based on north side).

図1 1/3葉序2段構成のFPM模式図(北基準)

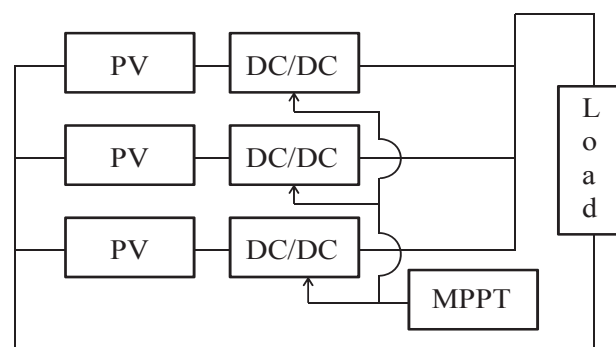


Fig. 2: System configuration diagram of FPM.

図2 FPMのシステム構成図

3. 実験方法

3.1 疑似FPMの構成

FPMでは、各太陽電池セルは扇形の単セルで構成されるが、扇形の単セルは一般に市販されていない。そこで本研究では、市販の正方形($129.5\text{mm} \times 129.5\text{mm}$)の単結晶シリコン太陽電池モジュール(ST-2G, 電菱, 公称最大動作電力2, 公称最大動作電圧4V, 公称最大動作電流0.5A, 開放電圧4.8V, 短絡電流0.54A, 寸法 $129.5 \times 129.5 \times 4.8(\text{mm})$, 質量190g, 8セル直列)をFPMにおける太陽電池セルとして用い、1/3葉序2段構成にてFPMを疑似的に構成した。図3に示すように1段あたりに配置される太陽電池セル数は3枚である。支柱に対して北方位に配置する太陽電池セルを1枚目(方位角 0°)として、太陽電池セルを時計方向に下向きに 120° ごとに回転させながら配置した。支柱に取り付ける各太陽電池セルの傾斜角度(θ_1)は地面と水平な状態

を 0 度とし、上向きを(+), 下向きを(-)とした(図 4)。傾斜角度 θ_1 の値は MET-PV⁶⁾ の日射量データを用いたシミュレーション³⁾により、年間を通して最大の日射量が得られる角度とした。各太陽電池セルの傾斜角度(θ_1)は、1 枚目(+40 度)、2 枚目(-33 度)、3 枚目(-31 度)である。また、FPM は立体的に太陽電池セルを配置する構成であることから、取り付け軸を中心に太陽電池セルを回転させることができる。ここで θ_2 は支柱に向かって反時計方向に回転させる角度を(+)とし、時計方向に回転させる角度は(-)とした。各方位において、この θ_1 と θ_2 を組み合わせることによって各方位での傾斜角が決定される。

表 1 に今回製作した疑似 FPM およびシミュレーション上の FPM の仕様と従来の平面型モジュールと比較して示す。平面型モジュールは南向きに+40 度の傾斜角度で設置されている。また、疑似 FPM の実測値と比較するため、先行研究のシミュレーション手法³⁾を用いた計算機シミュレーションも行った。シミュレーションでは、太陽電池セル表面に影がかからない面積のみで発電すると仮定した。また、シミュレーションでは、FPM を構成する支柱による影の影響や、太陽電池セル表面で反射した光などは考慮していない。影がかからない太陽電池セルの面積、変換効率、実験時に測定した日射量との積によって発電量を算出した(図 5)。



Fig.3: Quasi FPM using the square PV cell.

図 3 正方形の太陽電池セルを用いて構成された疑似 FPM

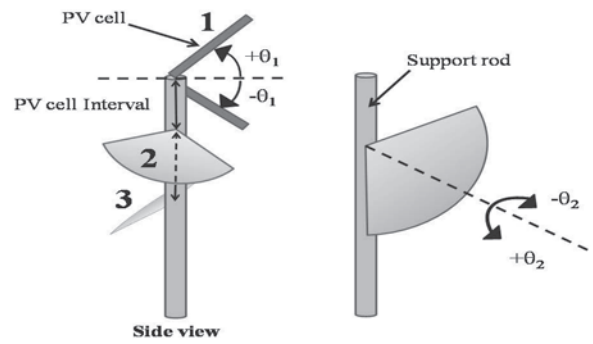


Fig. 4: The angle of gradient and rotation of the PV cell which constitutes FPM.

図 4 FPM を構成する太陽電池セルの傾斜角度と回転角度

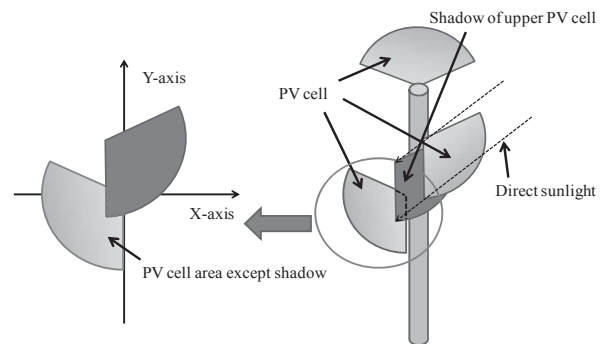


Fig. 5: Calculation of the PV cell area except shadow.

図 5 影のかからないセル面積の算出

Table.1: Specifications of module types.

表 1 疑似 FPM の仕様

Module type	FPM(simulation) FPM(experimental)	Conventional PV module (= first cell in the first stage $\times$ 3)
Number of PV cell of each stage	3	1
Form of PV cell	Sector central angle : 120 degrees (radulas PV cell : 129.5 mm) Square (129.5 mm $\times$ 129.5 mm)	Rectangle (129.5mm $\times$ 388.5mm)
Installation area of the module[m ²]	0.08(0.04 $\times$ 2 stages)	0.04
Installation interval of each PV cell[m]	0.05,0.15	—
Azimuth direction	Rotated 120 degrees (based on northern side)	South
Angle of Inclination θ_1 [°]	First cell of the stage : +40 Second cell of the stage : -33 Third cell of the stage : -31	+40
Angle of Inclination θ_2 [°]	0	—
Conversion efficiency[%]	12	
Installed capacity[W]	12 (2 $\times$ 3 $\times$ 2)	6 (2 $\times$ 3)
Form of support rod	Pillar (diameter:18mm)	—
Solar radiation condition	Insolation measured at experiment	
Installation site	Tokyo (northern latitude 35.7° , east longitude139.8°)	

3.2 測定方法

図6に疑似FPMの発電量測定回路を示す。疑似FPMを構成する各太陽電池セルは負荷の蓄電池、シャント抵抗と直列に接続され、発電時の電圧をデータロガー(midi LOGGER GL820, グラフテック)により測定した。蓄電池は(Ni-Cd:2.4V)を用いた。発電電流値はシャント抵抗(イサプラン汎用シャント抵抗器 PBV, PCN)より算出した。設置方位や傾斜角度の違いによる各太陽電池セルの特性を測定するため、太陽電池セルごとに発電特性を測定した。発電特性の計測周期は10分とした。実験に用いた太陽電池セルのI-V特性(実験条件:人工光源:白熱電球(100W)×5, 日射量 270W/m^2)を図7に示す。発電電流値は太陽電池表面に入射する日射量に依存して大きく変化するが、出力電圧は日射量にあまり依存しない。このため、疑似FPMの発電量特性は発電電流を計測することで解析した。測定は東京理科大学1号館屋上(北緯35.7度, 東経139.8度)で行った。また、全天日射量計(ネオ日射計 MS-402, 英弘精機)を用いて実験時の日射量測定を行った。

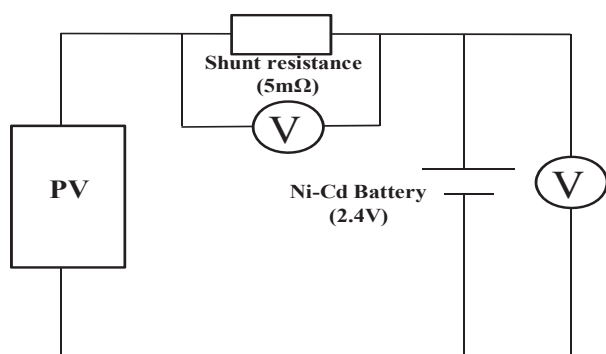


Fig.6: The output power characteristic measurement circuit of each PV cell in quasi FPM.

図6 疑似FPMにおける各太陽電池セルの発電特性測定回路

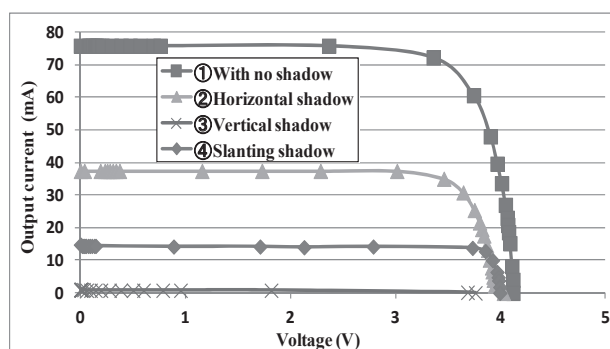
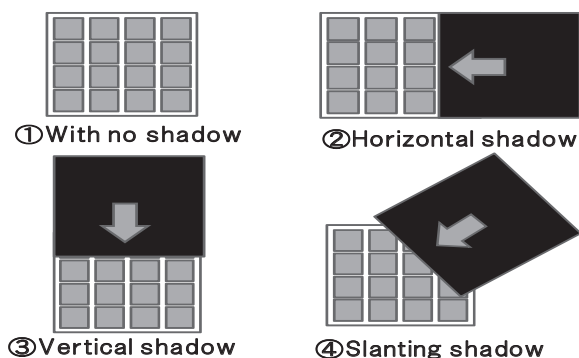


Fig. 7: I-V characteristic of PV cells used in this study.

図7 実験に用いた太陽電池のI-V特性

4. 疑似FPMの発電特性

4.1 時刻ごとの発電特性

疑似FPMを構成する各太陽電池モジュールを、FPMを構成する太陽電池セルと定義し、その発電特性を述べていく。図8にFPM1段目に配置された各太陽電池セルの時刻ごとの発電特性を、図9にFPM2段目に配置された各太陽電池セルの発電特性を示す(実験日:2012.10.21)。太陽電池間の鉛直方向の設置間隔は先行研究のシミュレーション結果と疑似FPMに用いた太陽電池モジュールの径より15cmとした³⁾。1段目に配置された各太陽電池セルには影の影響は見られない。1枚目の太陽電池セルと比較した場合、2枚目及び3枚目の太陽電池セルの1日の発電電流量は82%となった。

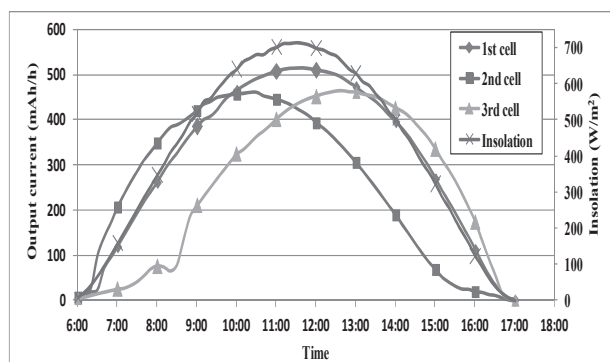


Fig.8: Output current of each PV cell in the first stage FPM.

図8 各太陽電池セルの発電特性(1段目)

2段目1枚目の太陽電池セルは上部に配置された太陽電池セルの影や、FPMを構成する支柱の影の影響を強く受け、8時以降の発電電流量が減少している。1段目の太陽

電池セルと比較した場合、2 段目に配置された太陽電池では、上部に存在する太陽電池の影や支柱の影の影響を受けて発電電流量が減少する。

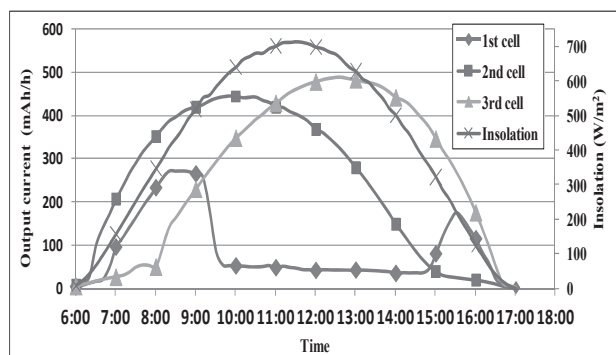


Fig.9: Output current of each PV cell in the second stage FPM.

図 9 各太陽電池セルの発電特性 (2 段目)

図 10 に FPM 設置段数ごとの発電特性を示す。垂直方向から見たときの太陽電池モジュールの投影面積を設置面積と定義する。FPM の設置面積あたりの発電電流量は、平面型モジュールと比較した場合、1 段構成では 82%だが、2 段構成にすることで 142%に増加する。FPM は鉛直方向に設置する太陽電池の数を増やすことで、平面型モジュール構成よりも設置面積あたりの発電電流量が向上する。

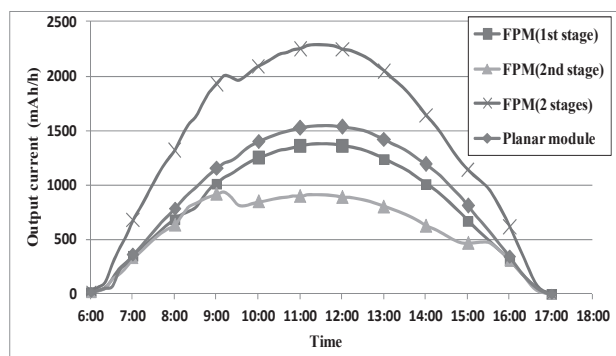


Fig.10: Output current of each stage FPM.

図 10 FPM 設置段数ごとの時間特性

図 11 に FPM1 段目に配置された各太陽電池セルの発電電流量を日射量で規格化した発電特性を示す。1 枚目の太陽電池セルは日射量変化と同様の特性を示す。2 枚目の太陽電池セルは日が昇り始めてから、9 時 40 分にかけて、平面型モジュールよりも日射量あたりの発電電流量が増加する。3 枚目の太陽電池セルは 13 時 20 分から日沈にかけて、平面型モジュールよりも日射量あたりの発電電流量

が増加する。

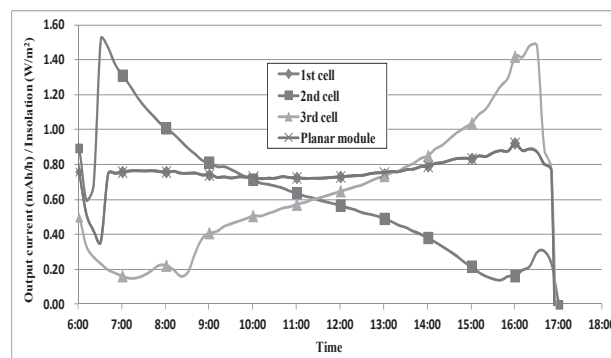


Fig.11: Output current of each PV cell in the first-stage FPM on a fine day.

図 11 各太陽電池セルの日射量に対する発電電流特性 (1 段目：晴れ)

4.2 月ごとの発電特性

図 12 に FPM 月ごとの発電特性を示す。何れの月でも、FPM の発電電流量は従来の平面型モジュールを上回る。太陽高度が高い 8 月では、2 段目に配置された各太陽電池セルは上部に存在する太陽電池の影の影響を受けて、1 日の発電電流量が最も減少する。太陽高度が低い 10 月、12 月においては、2 段目 2 枚目及び 3 枚目の太陽電池セルは、1 段目に配置された太陽電池セルによる影の影響が減少し、発電電流量の低下が減少する。2 段目 1 枚目の太陽電池セルは、支柱から見て北向きに配置されているために、上部に配置された太陽電池セルの影、及び支柱による影の影響を受け、FPM 全体の発電量に占める割合が最も小さくなる。

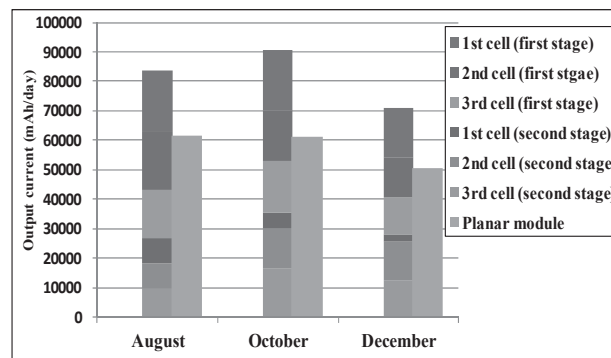


Fig.12: Output current of the FPM during each month.

図 12 月ごとの発電電流量

4. 3 実験値とシミュレーション値の比較

これまでに得られた疑似 FPM の発電特性とシミュレーションによる FPM の発電特性に太陽電池セル径の違いなどを含めて、どのような差異があるのか明らかにするため、実験値とシミュレーション値の比較を行う。

図 13 に実験時の日射量データを用いたシミュレーション結果と実験値との発電量比較図を示す。シミュレーションでは、FPM を表 1 に示すように扇形の太陽電池セルによって構成し、太陽電池の影がかからない面積でのみ発電すると仮定した。発電量は実験時に測定した日射データを用いて算出した。シミュレーションでは、平面型モジュールの設置面積あたりの発電量と比較した場合、1 段構成時では 81%だが、2 段構成にすることで 151%に増加する。2 段構成時における FPM の発電量はシミュレーション値と実験値(142%)との間に 9%の差異が見られる。

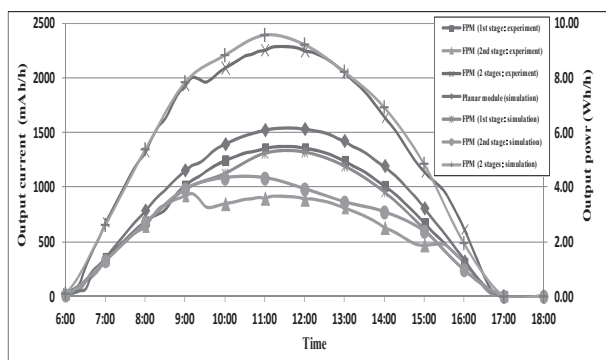


Fig.13: Output power comparison of an experimental value and a simulation value of FPM.

図 13 実験値とシミュレーション値の発電量比較

図 14 に FPM1 段目に配置された各太陽電池セルのシミュレーション値と実験値の発電量比較図を示す。1 枚目及び 2 枚目の太陽電池セルは、影の影響が見られず、シミュレーション値と実験値は同様の傾向を示す。3 枚目の太陽電池セルは 9:00 から 11:00 までの時間帯で実験値がシミュレーション値を上回っている。シミュレーションでは FPM を構成する各太陽電池セルの形状を扇形と想定しているため、実験に用いた太陽電池セルの形状(正方形)との差異によって 2 枚目の太陽電池セルの影がかかり、発電量が減少したことが原因と考えられる。

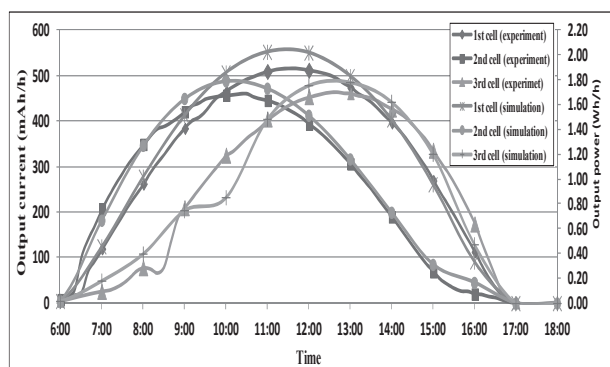


Fig.14: Output power of each PV cell in the first stage FPM.

図 14 1 段目に配置された各太陽電池セルの発電量

図 15 に FPM2 段目に配置された各太陽電池セルの発電特性のシミュレーション値と実験値の比較図を示す。1 枚目の太陽電池セルは、9 時以降、シミュレーション値と比較して実験値は大きく減少している。シミュレーションでは支柱による影の影響を考慮していない、単セルの太陽電池セルによって FPM が構成されると想定している等の違いによって、実験に用いた太陽電池セルでは太陽電池表面にかかる影の面積以上に電流量が減少したことがシミュレーション値と実験値の差異の原因と考えられる。2 枚目及び 3 枚目の太陽電池は 1 段目に配置された各太陽電池セルと同様の特性を示した。

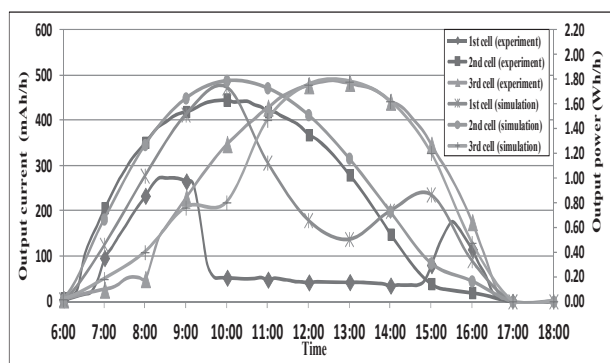


Fig.15: Output power of each PV cell in the second stage FPM.

図 15 2 段目に配置された各太陽電池セルの発電量

FPM2 段目 1 枚目の太陽電池セルのシミュレーション値と実験値の特性が大きく異なることに着目し、実験に用いた太陽電池セルをシミュレーションと同様に単セル構成の太陽電池と仮定した場合の補正值との発電特性の比較を行う。補正值の算出は、実験中に太陽電池セルを 1 時間ごとに写真撮影し、太陽電池セル表面の影がかからない部

分でのみ発電すると仮定して、太陽電池セルの影がかからない面積比 $\{(2-①)/②\}$ 、太陽電池セルの面積、実験時の日射量、変換効率との積で発電量を算出した(図 16)。

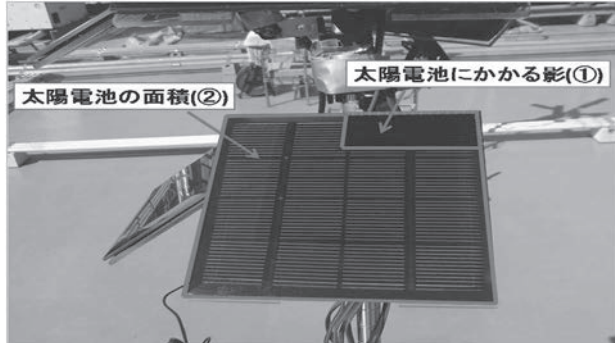


Fig.16: Calculation of correction value using a photograph.

図 16 写真を用いた補正値の算出

写真を用いた補正値と実験値及びシミュレーション値の発電特性の比較を図 17 に示す。補正値と実験値を比較すると、9 時以降、太陽電池セルに影がかかり始めてからその発電量に大きな差異が見られる。実験に用いた多セル構成の太陽電池では、太陽電池表面に影のかかった面積以上に、太陽電池を構成する複数のセルに対する影のかかり方によって発電量が減少したことが補正値と実験値の差異の原因だと考えられる。

以上のことから、シミュレーションでは FPM を構成する太陽電池セルが単セルで構成されていると想定していることが実験値との差異の主な原因だと考えられる。今後は本実験で得られた内容を基に、FPM を構成する太陽電池セル内でセル分割を行うシミュレーション手法を検討することが FPM を実運用する際に必要であると考えられる。

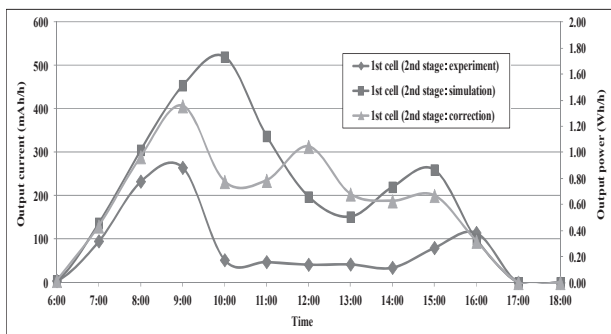


Fig.17: Output power comparison of photograph correction value.

図 17 写真補正値との発電量比較 (2 段目:1 枚目)

5. まとめ

3 次元太陽光発電モジュール(FPM)を用いた太陽光発電システムにおいて、北基準 1/3 葉序 2 段構成の疑似 FPM を製作し、以下の結果を得た。

- (1) 疑似 FPM は設置段数を増加させることで、従来の平面型モジュールと比較して 1.42 倍の設置面積当たりの発電量を得る。
- (2) 疑似 FPM は、各太陽電池セルを異なる方位に向けて配置することで、太陽高度の低い朝夕の時間帯においても日射量を効率的に利用できる。
- (3) 疑似 FPM の発電量は、シミュレーション値と 9 % の差異で一致する。
- (4) 実験値とシミュレーション値との差異の原因としては(a) FPM を構成する太陽電池セルの形状の違い(b) FPM を構成する支柱による影の影響(c)実験に用いた太陽電池セルでは、セル表面に影がかかった場合、影がかかった面積以上に発電電流量が減少する、等が挙げられる。

以上により、今回製作した疑似 FPM は従来の平面型モジュールと比較して設置面積当たりの発電量、朝夕時の日射量の有効利用に対して優位性があると言える。

今後の課題としては、参考とする葉序、太陽電池セル内のセル分割を考慮したシミュレーション手法の構成、太陽電池セルの形状、支柱による影の影響などを考慮した構成法の検討があげられる。

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) Trends in Photovoltaic Applications -2013 Edition.
<http://www.iea-pvps.org/>
- 2) Y. Asai, T. Yachi : A Novel Photovoltaic Module Assembled Three-Dimensionally, 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Proceedings on CD, pp.2811-2816,Honolulu (2010)

- 3) T. Suto, S. Suzumoto, T.Yachi : Output Power Decrease by Shadows of Each Cell in the Photovoltaic System Using Three-Dimensional Modules, JAPAN SOLAR ENERGY SOCIETY Vol.38 No.2, PP.47-54 (2012) (in Japanese)
- 4) アルフレッド・S・ボザマンティエ, イングマル・レーマン: 不思議な数列 フィボナッチの秘密, 日経 BP 社(東京), 第 2 章 (2010)
- 5) K. Akiyama, Y. Nozaki, M.Kudo, T.Yachi : Ni-MH Batteries and EDLCs Hybrid Stand-Alone Photovoltaic Power System for Digital Access Equipment, 2000 IEEE International Telecommunications Energy Conference, Proceedings on CD, pp.387-393, Phoenix (2000)
- 6) NEDO
http://www.nedo.go.jp/library/shiryou_application.html