

Electric Power Generation Characteristics of Three-Dimensional Fibonacci Number Photovoltaic Modules (FPMs) and Its Effective Cell Configuration

Yuki MOCHIZUKI*¹Toshiaki YACHI*^{2‡}

3次元太陽光発電モジュール FPM の発電特性とセル構成

望月 祐希¹谷内 利明^{2‡}

Abstract

Three-dimensional Fibonacci number photovoltaic modules (FPMs), which are designed in part based on natural plant leaf arrangements, were proposed as a means of efficiently collecting solar energy. In this study, a novel simulation model of an FPM electric power using horizontal solar radiation intensity is proposed. It is shown that the simulation results are reasonable by comparing with the experimental ones of the 1/3-phyllotaxis 2-stage FPM. Using this simulation model, it is given the annual electric power generation characteristics of the FPM. It is also proposed the effective cell configuration with stripe patterns in the FPM photovoltaic panels.

Keywords: 3-dimensional, Fibonacci Number, Phyllotaxis, Electric Power Estimation, Cell Division Pattern
キーワード: 3次元, フィボナッチ数列, 葉序, 発電電力推定, セル分割パターン

1. はじめに

広い面積を必要とする太陽光発電では、土地を効率良く利用することが必要になる。このため、太陽電池パネルを3次元に設置して、パネル面積当たりの発電量は減少するが、設置面積当たりの発電量を増大することが有効である。3次元設置された太陽光発電システムの一つとして、著者らは植物の葉序に倣ったFPMを提案している⁽¹⁻³⁾。植物は、効率的に光合成を行うためフィボナッチ数列 ($F_n=0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13\dots$) に基づく葉の付き方を持つ⁽⁴⁾。これを葉序と言い、葉序は F_n/F_{n+2} で示され、1/2葉序、1/3葉序、2/5葉序、3/8葉序などがある。分子は葉の周回数、分母はその周回数当たりの葉数を表す。葉と葉の間の角度は開度と呼ばれ、1/3葉序では $1/3 \times 360^\circ = 120^\circ$ となる。フィボナッチ数が大きくなるに連れて開度は理想値 137.5° に近づくとされる。

FPM については、直達日射による発電電力シミュレーションモデル⁽²⁾、1/3葉序2段階構成FPMの発電電力⁽³⁾、FPM複数設置による発電電力^(5,6)、太陽電池パネル内セル分割パターンと発電電力⁽⁷⁾などを既に報告した。本研究では、FPMの広範な普及を図るため、入手が容易な水平面全天日射強度から算出した直達日射と散乱日射による発電電力シミュレーションモデルを新たに提案する。また、発電電力実測値と比較してその推定値の妥当性を検証する。さらに、このシミュレーションモデルを用い、1/3葉序2段階構成FPMの年間発電特性を明らかにすると共に、FPMに用いる太陽電池パネル内の有効なセル形状・構成を示す。

2. 発電電力の測定と推定モデル

2.1 発電電力の測定

測定には図1に示す1/3葉序2段階構成FPMを用いた。

*1 Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science

*2 Professor, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, 6-3-1, Nijjuku, Katsushika-ku, Tokyo 125-8585 Japan

‡e-mail: yachi@rs.kagu.tus.ac.jp

Received: 26 Nov. 2019, Accepted: 27 Jan. 2020

*1 東京理科大学大学院 工学研究科

*2 東京理科大学工学部第二部 嘱託教授 (〒125-8585 葛飾区新宿 6-3-1)

‡e-mail: yachi@rs.kagu.tus.ac.jp

(原稿受付: 2019年11月26日, 受理日: 2020年1月27日)

太陽電池パネルは、8セル直列接続されたフレームレス単結晶 Si 太陽電池パネル (ST-2G) (8) とした。I-V、P-V 特性を図 2 に示す。最上部の 1 枚目パネルを下部パネルへの影の影響が少ない北方位とし(2)、上から見て時計回りに順次 6 枚目パネルまでを取付けた。パネル傾斜角 θ は年間を通して最も発電量が見込める角度とした(9)。表 1 に主な太陽電池の仕様と FPM 構成条件を示す。真上から見た地面への投影面積を設置面積とすると、1/3 葉序 2 段構成 FPM の設置面積は 0.0355m² で、太陽電池パネル総面積は 0.0864m² になる。また、ほぼ同等の設置面積を持つ平面設置パネルとして 1 枚目パネルを 3 枚横に並べた太陽光発電パネルを仮定すると、その設置面積は 0.0331m²、パネル総面積は 0.0432m² となる。

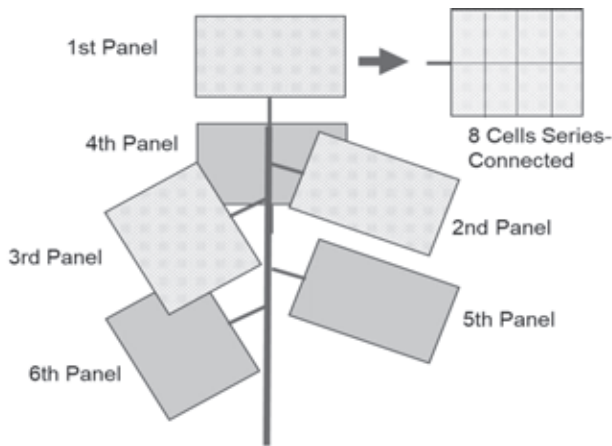


Fig. 1 Schematic diagram of a 2-stage 1/3-phyllotaxis FPM.

発電特性はデータロガー (midiLOGGERGL800) により取得した。太陽電池パネル毎の出力を 5m Ω のシャント抵抗を介して負荷の Ni-Cd 二次電池 (定格電圧 1.2V) に接続し、シャント抵抗の電圧から発電電流を、負荷電圧から発電電圧を求めた。なお FPM では、太陽電池パネル毎に最大出力動作点が異なるため、総出力を取出す場合には、パネル毎に DC-DC コンバータを設けて最大出力点で動作させることが必要になる(7)。日射強度の測定には全天日射計 (MS-80) を用いた。測定は、東京理科大学葛飾校舎屋上 (北緯 35.8 度, 東経 139.9 度) で、晴天日の 5 月 15 日および曇り時々晴れの 7 月 26 日に行った。

FPM 各太陽電池パネルでは最大出力動作点が異なるため、各パネルの最大電力を同時に測定することが困難である。そこで最大発電電力 P_m は、1 ダイオード等価回路を用いて発電電流・電圧測定値から(1)式を用いて算出した(10)。短絡電流 I_{sc} は、測定発電電圧が定格電圧より十分小さいので測定電流値とした。また、次節で示す簡易な発電電力推定法では温度条件を考慮しないので、太陽電池温度は基準値 25 $^{\circ}$ C と仮定した。ダイオード飽和電流 I_0 はデータシートから求め 1.424×10^{-10} A とした。

$$I_{op} = N_p I_{sc} - N_p I_0 \{ \exp(qV_{op}/kTN_s) - 1 \} \quad (1)$$

ここで、 I_{op} 、 V_{op} は動作電流・動作電圧、 N_p 、 N_s は並列および直列セル数、 k はボルツマン定数である。

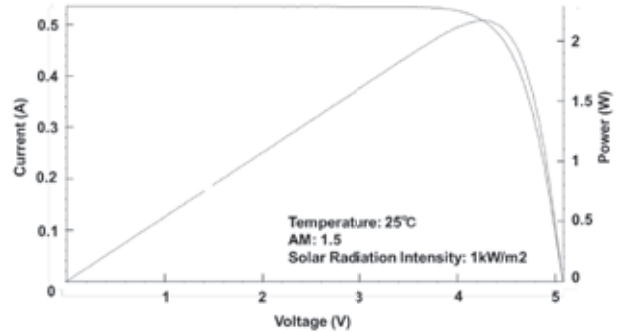


Fig. 2 I-V and P-V characteristics of the ST-2G.

Table 1 Experimental conditions.

	Conditions
Solar Panel	Type: Single Crystalline Silicon Size S_0 : 12cm x 12cm Conversion Efficiency η : 14%
FPM Configuration	Type: 1/3-Phyllotaxis 2-Stage Tilt Angle θ : 1 st and 4 th Panel 40 degree, 2 nd and 5 th Panel 33 degree, 3 rd and 6 th Panel 31 degree Installation Interval: 10cm

2.2 発電電力推定モデル

水平面全天日射強度 H から算出する発電電力推定シミュレーションフローを図 3 に示す。直散分離には Erbs モデル(11)を用いた。直達日射による電力は、太陽高度 α における太陽日射強度 H_{d0} と、投影法(5)で求めた影の掛からない太陽電池セル面積 S_d および変換効率 η を乗して算出した。8セル直列接続された太陽電池パネルでは、影の面積が最も多いセルの直達日射面積を 8 倍して S_d とした。散乱日射強度は等方性モデル(11)で求めた。傾斜角 θ の斜面散乱日射強度 H_{ss} は、水平面散乱日射強度 H_s から $H_{ss} = H_s(1 + \cos\theta)/2$ として求めた。本論文の FPM 構成では上部パネルによる下部パネルの天空率低下は数%程度と小さいので無視した。散乱日射による電力は H_{ss} に太陽電池パネル面積 S_0 および変換効率 η を乗して算出した。

シミュレーションでは、太陽電池パネル内のセル分割を実験で用いた格子セルパターンに加えて、図 4 に示すように影の影響が少ない縞セルパターンも検討した(7)。縞セルパターンは、8 分割セルパターンと 16 分割したセルを図のように離れた 2 セルを並列接続したパターンとした。日射量データには、METPV-11(12)の春季 (3 月 22 日)、夏季 (6 月 20 日)、秋季 (9 月 29 日)、冬季 (12 月 20 日) 各晴天日のデータを用いた。

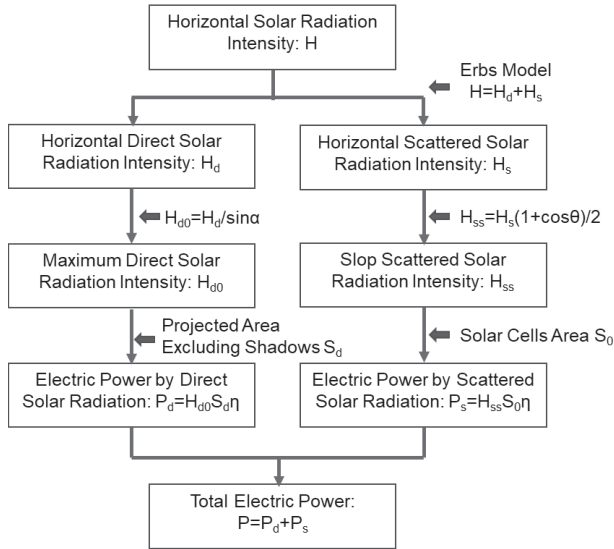


Fig.3 FPM electric power estimation flow using horizontal solar radiation intensity.

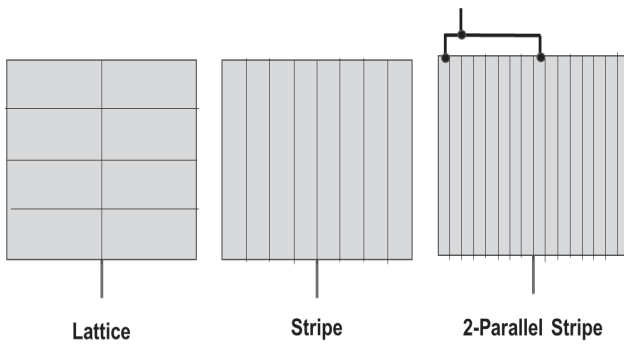


Fig. 4 Cell division patterns of FPM panel.

3. 結果と考察

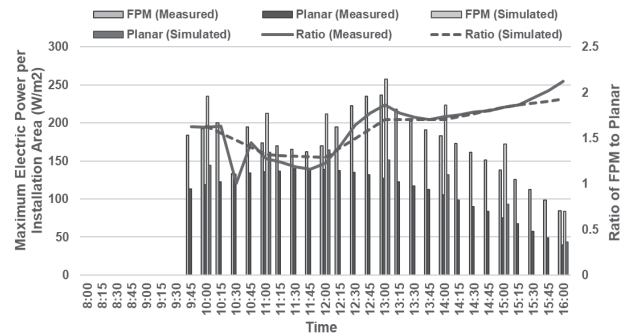
3.1 実測および推定発電電力

5月15日における設置面積当たりの最大発電電力の測定値および推定値の時刻変化を図5(a)に示す。測定値は15分毎、推定値は60分毎のデータである。また、FPM発電電力と擬似平面設置パネル発電電力（1枚目パネル発電電力の3倍）との比も併せて示す。測定値と推定値は概ね一致する。推定値の相対誤差（|推定値-測定値/測定値|）の平均は17.5%である。誤差要因には、太陽電池パネルの特性ばらつきやパネル温度、傾斜角・方位角などの設置精度、支柱の影、日射強度の直散分離精度、散乱光の上部パネルによる天空率の減少などが考えられる⁽¹³⁾。夏至に向かって太陽高度が比較的高く南中時近傍ではFPMの上部パネルにより下部パネルに影が多く生じるため、測定値および推定値共に発電電力の低下が見られる。平面設置に対する設置面積当たりの発電電力は、1枚目パネルの発電電力が大きい南中頃では1.5倍を下回るが、一日の平均では約1.6倍になる。

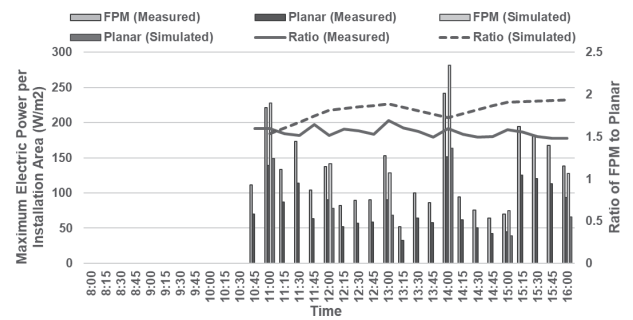
7月26日における設置面積当たりの最大発電電力の時

刻変化を図5(b)に示す。晴天日と同様に測定値と推定値は概ね一致する。推定値の相対誤差平均は8.6%である。平面設置に対する設置面積当たりの発電電力は、測定値では1.6倍、推定値では1.8倍を示し、共に一日を通して大きな変化が見られない。

以上、提案する発電電力推定モデルは天候に依らず概ね実測値を反映し、FPMの特性把握を行う推定モデルとして妥当である。



(a) May 15th (sunny day).



(b) July 26th (cloudy day)

Fig. 5 Experimental and simulated electric power per installation area of the 1/3phyllotaxis 2-stage FPM.

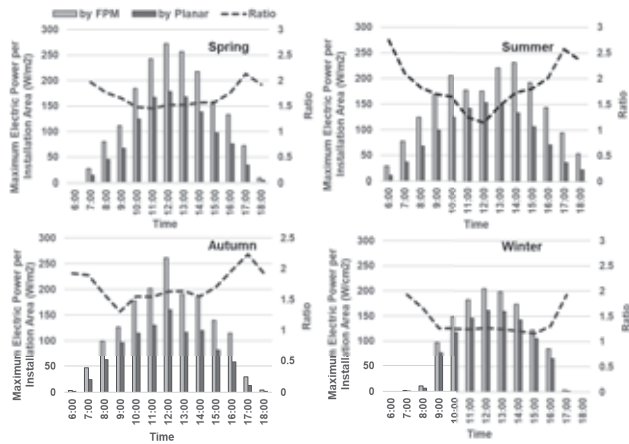
3.2 FPMの年間発電特性

シミュレーションによる格子セルパターン 1/3 葉序 2 段階構成 FPM の春季、夏季、秋季、冬季各晴天日における、1 時間ごとの設置面積当たりの最大発電電力の時刻変化を擬似平面設置と比較して図6(a)に示す。また FPM を構成する太陽電池パネル毎の最大発電電力の時刻変化を図6(b)に示す。FPM の設置面積当たりの発電電力は各季節とも一日を通して平面設置を上回る。夏季南中時の太陽高度が高い時間帯と冬季では平面設置の 1.5 倍を下回るが、概ね全体に 1.5 倍を上回り四季平均では 1.53 倍となる。

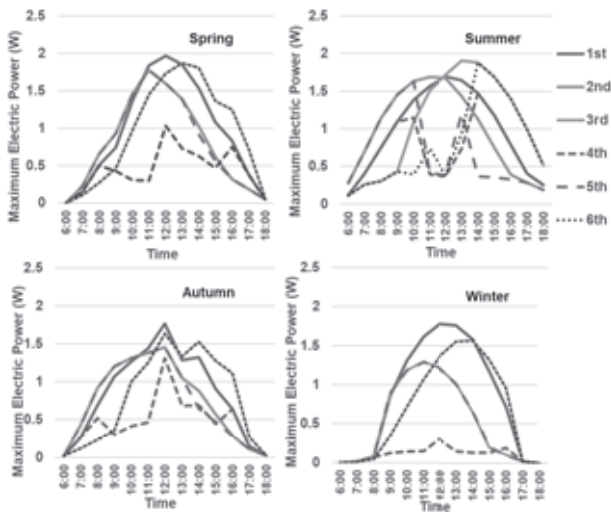
夏季南中時の FPM の発電電力低下は、図6(b)に示されるように、4 枚目、5 枚目、6 枚目太陽電池パネルに上部パネルの影が生じることに因る。また、冬季の 4 枚目パネルでは午前 2 枚目パネルが、午後 3 枚目パネルが影を落とし、一日を通して発電電力が低下する。

各季節一日の太陽電池パネル毎の発電電力量（各時刻の発電電力×1時間）を図7に示す。5 枚目、6 枚目パネ

ルを除いて、日照時間の長い夏季の発電電力量が最も多く、日照時間の短い冬季の発電電力は全てのパネルで最も少ない。また、各季節とも4枚目パネルの発電電力量の低下が最も著しく、影の影響がない1枚目パネルに比較して春季46%、夏季71%、秋季55%、冬季13%の電力となる。



(a) Maximum Electric Power per Installation Area of FPM



(b) Maximum Electric Power of each Panel

Fig. 6 Maximum electric power of four seasons in 2-stage 1/3-phyllotaxis FPM with a lattice cell pattern.

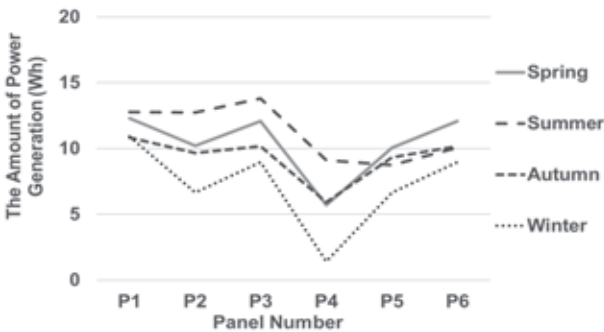


Fig. 7 The amount of power generation of each panel in 2-stage 1/3-phyllotaxis FPM with a lattice cell pattern.

FPM の設置面積当たり各季節一日の発電電力量を擬似平面設置と比較して図 8 に示す。日照時間の長い夏季の発電電力量が最も多く、冬季の約 1.5 倍である。春季、夏季、秋季の発電電力量は、平面設置の約 1.6 倍となるが、4 枚目太陽電池パネルの発電電力が著しく減少する冬季では約 1.2 倍となる。四季平均は、平面設置の 1.53 倍となり、因みにこれは太陽電池パネル面積当たりでは平面設置の 77%に相当する。

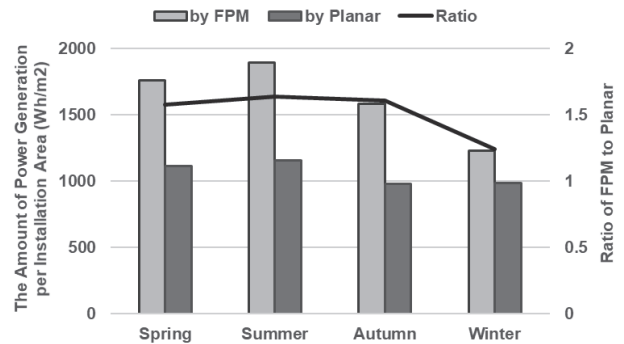


Fig. 8 The amount of power generation per installation area in the FPM with a lattice cell pattern to power generation in planar configuration panel.

3.3 FPM 太陽電池パネルの効果的なセル構成

上部太陽電池パネルが下部パネルに落とす影の影響による発電電力低下を抑制するには、セル形状を縞セルパターンにすることが有効である⁽⁷⁾。図 4 に示した各セル形状・構成を持つ FPM の夏季における発電電力の時刻変化を図 9 に示す。一日を通して縞セルパタンの発電電力が格子セルパターンに比較して大きく、一日の平均では 8 分割縞セルパターンでは 1.05 倍、16 分割 2 並列縞セルパターンでは 1.08 倍になる。特に下部パネルに影の影響が生じる南中頃 (12 時) では、格子セルパターンに比較して縞セルパターンでは発電電力が 1.24 倍になる。南中時近傍における擬似平面設置に対する設置面積当たりの発電電力も、格子セルパターンでは 1.23 倍であるが、縞セルパターンでは 1.6 倍を超える。この発電特性の傾向は、春季、秋季、冬季でも同様に見られる。

1 枚目太陽電池パネルと各セル形状における 4 枚目パネルの夏季および冬季の発電電力を図 10 に示す。夏季 12 時における 4 枚目パネルの発電電力は、格子セルパターンでは 1 枚目パネルの 22%まで減少するが、8 分割縞セルパターンおよび 16 分割 2 並列縞セルパターンでは 1 枚目パネルの 67%にまで発電電力が回復する。また南中を挟む 10 時、13 時においては、16 分割 2 並列縞セルパターンは 8 分割縞セルパターンよりも発電電力の低下が少ない。冬季 12 時における 4 枚目パネルの発電電力は、格子セルパターンでは 1 枚目パネルの 17%まで減少するが、8 分割縞セルパターンでは 49%、16 分割 2 並列縞セルパターンでは 73%となり、発電電力の大幅な回復が見られる。

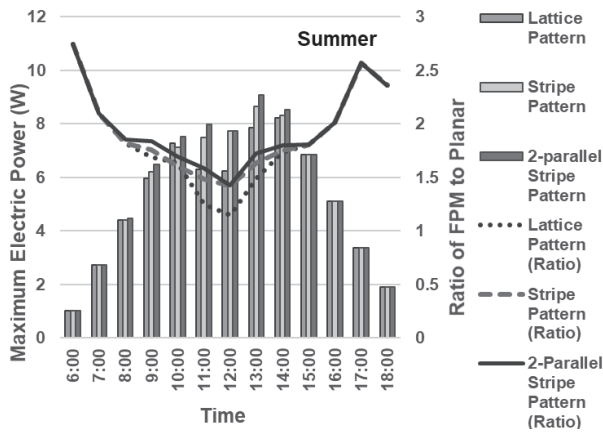


Fig. 9 Maximum electric power in FPM with each cell pattern and the ratio of its to maximum electric power in planar panel in summer.

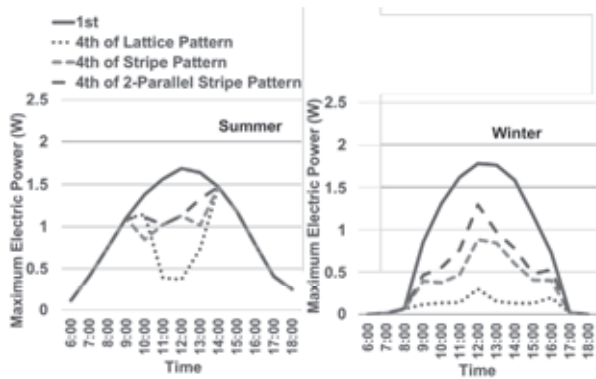


Fig. 10 Maximum electric power of 1st and 4th panels in the FPM with each cell pattern in summer and winter.

夏季 6 月 20 日 12 時における、投影法による太陽から見た FPM の、4 枚目パネルの影の状況を図 11 に示す。4 枚目パネルでは 1 枚目パネルの影が掛かり格子セルパターンでは完全に直達光が照射されないセルが生じる。このため、4 枚目パネルの発電電力は散乱光による電力のみとなる。一方、縞セルパターンではセルの約 4 割に影が掛かるが、1 枚目パネルの 6 割に当たる直達光による発電電力が得られる。16 分割 2 並列縞セルパターンでも、影が 4 枚目パネルの北側ほぼ全体に掛かるため、最も影の掛かるセルの影面積が 8 分割縞セルパターンと変わらず、図 9 に示されたように同じ発電電力となる。

図 4 の各セル形状を持つ 4 枚目太陽電池パネルにおける、各季節の発電電力量を 1 枚目パネルと比較して図 12 に示す。4 枚目パネルの発電電力量は、各セル形状とも 1 枚目パネルに比較して夏季の低下が最小で冬季の低下が最大になる。夏季の発電電力量低下は南中時頃に 1 枚目パネルが影を落とすことによっており、影になる時間が比較的短い。一方、冬季では午前中は 2 枚目パネルが、午後は 3 枚目パネルが影を落とし、長時間にわたり影が掛かるため発電電力量の低下が大きくなる。セル形状を

格子セルパターンから 8 分割縞セルパターンに、さらに 16 分割 2 並列縞セルパターンに代えることによって発電電力量の低下は抑制される。発電電力量の低下が少ない夏季では、8 分割縞パターンおよび 16 分割 2 並列縞パターンの 4 枚目パネル発電電力量は、格子セルパターンに比較してそれぞれ 1.15 倍および 1.22 倍となる。一方、発電電力量の低下が著しい冬季では、それぞれ 3.14 倍および 4.18 倍と大きく改善される。

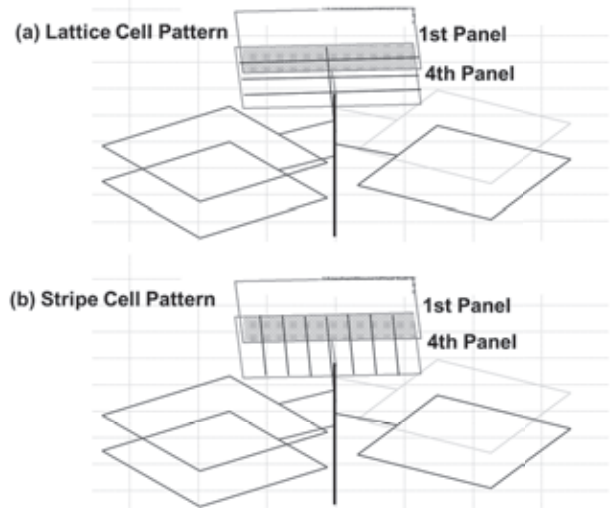


Fig. 11 The situation of the shadow in the 4th solar panel in the projection at 12:00 on June 20th.

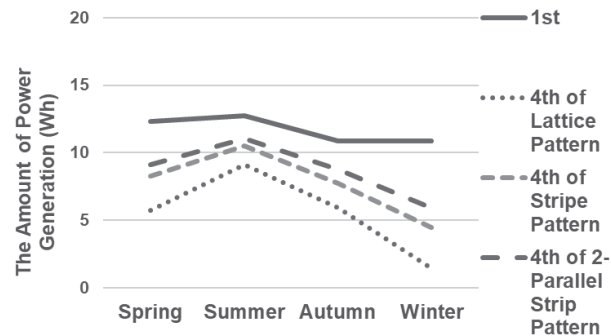


Fig. 12 Maximum electric power of 1st and 4th panels in the FPM with each cell pattern in four seasons.

各セル形状を持つ 1/3 葉序 2 段構成 FPM の各季節一日の設置面積当たり合計発電電力量、および擬似平面設置発電電力量との比を図 13 に示す。発電電力量は各季節とも、格子セルパターンから 8 分割縞セルパターン、さらには 16 分割 2 並列縞セルパターンに代えることによって増大する。四季合計の発電電力量は、8 分割縞セルパターンでは格子セルパターンの 1.05 倍、16 分割 2 並列縞セルパターンでは 1.08 倍となる。平面設置に対する設置面積当たり発電電力量も、格子セルパターンの 1.53 倍から 8 分割縞セルパターンでは 1.61 倍に、16 分割 2 並列縞セルパターンでは 1.64 倍に増大する。なお、太陽電池パネル面積当たりでは、

この 16 分割 2 並列セル縞セルパタンの発電電力量は平面設置の 82%に当たる。

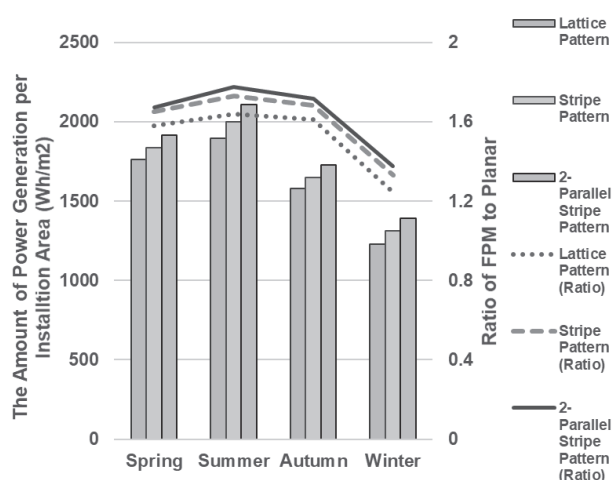


Fig. 13 The amount of power generation per installation area in the FPM with each cell pattern.

4. まとめ

水平面全天日射強度を直散分離した日射による、FPM 発電電力の投影法推定モデルを提案・検証すると共に、それを用いて 1/3 葉序 2 段構成 FPM の発電特性を求め、以下の結果を得た。

- (1) 本研究で示した推定モデルによる発電電力は概ね実測値と一致し、推定モデルとして妥当である。相対誤差は十数%である。
- (2) 格子セルパターン 1/3 葉序 2 段構成 FPM の設置面積当たりの発電電力量は、比較的太陽高度の高い春季、夏季、秋季では平面設置の約 1.6 倍を示し、太陽高度の低い冬季は約 1.2 倍になる。一年を通じた発電電力量では、平面設置の 1.53 倍が望める。
- (3) 縞セルパターンを有する太陽電池パネルでは、FPM における影による発電電力の低下を抑制できる。単純な縞セルパターンでは、格子セルパターンに比較して 5%以上の発電電力量の増加が、また離れた 2 セルを並列接続した縞セルパターンでは 8%以上の増加が望める。因みにこれらは設置面積当たり発電電力量では平面設置の 1.6 倍を超え、太陽電池パネル面積当たりでも 80%以上に当たる。

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 26420248 の助成を受けて行われた。

6. 参考文献

- 1) Y. Asai, T. Yachi, A Novel Photovoltaic Module Assembled

Three-Dimensional, Proc. 35th IEEE PVSC (Jun. 2010), 2811-2816, Honolulu, USA.

- 2) T. Suto, S. Suzumoto, T. Yachi, Output Power Decrease by Shadows of Each Cell in the Photovoltaic System Using Three-Dimensional Modules, Journal of Japan Solar Energy Society, **38** (2), 47-54 (2012).
- 3) S. Suzumoto, T. Yachi, Output Power Characteristics of the 3-Dimensional Photovoltaic Module Using Fibonacci Numbers 1/3-Phyllotaxis with 2-Stages Quasi FPM, Journal of Japan Solar Energy Society, **40** (2), 45-52 (2014).
- 4) A. S. Posamentier, The Fabulous Fibonacci Numbers, Chapter 2 (2010), Prometheus Books, New York.
- 5) T. Nishiwaki, T. Yachi, The Arrangement of Fibonacci Number Photovoltaic Modules for Power Generation Forests, JSES/JSWS Joint Conference (Nov. 2015), 315-318, Miyazaki, Japan.
- 6) A. Takahashi, T. Yachi, Arrangement of Fibonacci Number Photovoltaic Modules by the Simulation Using Direct and Scattered Light for Power Generation Forests, Proc. 6th ICRERA (Dec. 2017), 378-382, San Diego, USA.
- 7) Y. Mochizuki, T. Yachi, Effective Series-Parallel Cell Configuration in Solar Panels for FPM Power Generation Forest, Proc. 7th ICRERA (Oct. 2018), 294-300, Paris, France.
- 8) Denryo HP (accessed April 17th 2019), www.denryo.com/solar_panel/furemuresu_panel/st-2g.html
- 9) Y. Yoshida, T. Yachi, Optimization of Cell Tilt Angles of the Fibonacci Number Photovoltaic Module (FPM), JSES/JSWS Joint Conference (Nov. 2016), 57-60, Matsuyama, Japan.
- 10) A. Khaligh, O. C. Onar, Energy Harvesting, 9-15 (2010), CRC Press, Boca Raton.
- 11) A. Itagaki, J. Hashimoto, Revised Edition New Solar Energy Utilization Handbook, 20-28 (2015), Japan Solar Energy Society, Tokyo.
- 12) NEDO HP (accessed May 16th 2019), <http://app0.infoc.nedo.go.jp/>
- 13) T. Yachi, Y. Mochizuki, Electric Power of 3-Dimensional Photovoltaic Module FPM by Experiment and Estimation, JSES Conference (Oct. 2019), 212-215, Aomori, Japan.