

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 8 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420248

研究課題名(和文)3次元太陽光発電モジュールFPMを用いた発電樹林構成法

研究課題名(英文)Arrangement of Fibonacci numbers photovoltaic modules for power generation forest

研究代表者

谷内 利明 (Yachi, Toshiaki)

東京理科大学・工学部第二部電気工学科・教授

研究者番号：90349845

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽エネルギーの最大限の活用を図るため、植物の葉序に倣った3次元太陽光発電モジュールFPMを多数配置する発電樹林を提案し、その特性を計算機シミュレーションと実験により明らかにした。計算機シミュレーションでは、自身および隣接FPMの太陽電池パネルによる影を考慮できる投影法による発電量算出モデルを新たに構築した。単独FPMでは太陽電池パネル内でのセル直列接続数 n に伴い発電量は約 $1.5n\%$ で減少することや、発電量の葉序依存性が小さいことを明らかにした。また、FPMを多数配置する発電樹林では、ハニカムパターンとすることで隣接FPMによる影の影響を抑制できることを示した。

研究成果の概要(英文)：As a method of increasing electric power generation in a size-limited installation area, photovoltaic modules assembled with a three-dimensional structure that is based on the Fibonacci number (FPM) have proven effective. We have proposed mega-solar sized power generation forests using the multiple FPMs. The generation forests electric characteristics have been studied by the computer simulation by using a projection method and the field test using single crystalline silicon solar cells. It is shown that the amount of a single FPM power generation decreases with the number of series cell connections and is little depended on phyllotaxis patterns. It is also shown that the honeycomb pattern FPM forest provides the largest amount of generated power per unit area.

研究分野：工学・電気エネルギー変換工学

キーワード：太陽光発電 再生可能エネルギー 植物の葉序 フィボナッチ数列 メガソーラー ハニカムパターン
太陽エネルギー利用向上

1. 研究開始当初の背景

(1) 低炭素社会の実現を目指して種々の再生可能エネルギー技術の研究開発が進められている。再生可能エネルギー技術の中でも太陽光発電は、無尽蔵に降り注ぐ太陽光を利用し、発電に伴う有害な排出物もないため、その普及拡大が大いに期待される。固定価格買取制度の本格普及によりメガソーラ等の太陽光発電設備導入量が指数関数的に増大し、世界の累積設備容量は 228GW を超えて発電用原子炉 200 基分以上となっている。日本でも、サンシャインプロジェクトから継続した NEDO などの技術開発施策により、太陽光発電の技術開発では世界をリードしてきており、2012 年 7 月からの固定価格買取制度の本格導入により、メガソーラ等の建設が進み累積設備容量は 20GW に達している。この太陽光発電の指数関数的導入量増大に伴い、太陽電池モジュール価格も当初目標を大きく超えて低減されている。

(2) 太陽電池モジュールの大幅な価格低減に合わせて、太陽光発電システムの構成においても、その低価格を生かす工夫が必要となる。従来の太陽光発電システムでは、太陽電池セルが高価なため太陽電池セルが最も有効に働く(太陽電池セル面積当たりの発電量を最大にする)ように、太陽光発電モジュールを南面に緯度と同程度の傾斜を持たせて平面で設置している。このため、太陽高度の低い朝夕や冬季、また太陽高度の高い夏季では、太陽エネルギーを最大限に利用できない課題がある。そこで、太陽電池当たりの発電量を最大にする従来の太陽光発電モジュール構成から、設置面積当たりの発電量を最大にする、すなわち太陽エネルギーを最大限に利用できるモジュール構成への転換が考えられ、フィボナッチ数列を基にして樹木状(3次元)に構成した新たな太陽光発電モジュール(Fibonacci Numbers Photovoltaic

Module: FPM) が提案され、FPM の最適形状や有効性が実験とシミュレーションを基に報告されている。

(3) FPM では、図 1 に示すように支柱に太陽電池パネルを植物の葉のように鉛直方向に沿って 3 次元に複数段取り付ける。植物の葉は、鉛直方向から見た場合、ある角度(開度)をもって順に茎から成長する。この葉のつき方を葉序と言い、葉序はフィボナッチ数列(1、1、2、3、5、8...)に基づいていることが知られている。茎から 8 方向に葉が成長する場合、葉のつき方は 3/8 葉序となり、順番の隣り合った各葉は、135 度(360×3/8)の開度を持つ。このようにして、植物では太陽エネルギーの最大利用が図られている。

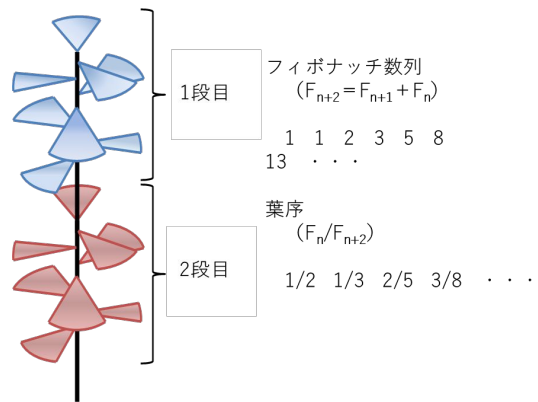


図 1 植物の葉序をまねた FPM の模式図

(4) 図 2 は単結晶 Si 太陽電池を用いた 1/3 葉序 2 段構成の疑似 FPM で、設置面積当たりの発電量が従来の平面型に比べて 1.5 倍になることが報告されている。平面パネル構成のメガソーラの大規模な導入は、クリーンエネルギーの利用拡大を図る反面、広大な土地を遮蔽することによる植生への影響等が懸念される。一方 FPM では、上記のように太陽エネルギーの最大限の利用が図れると共に、良好な通風性や時刻に応じて光の遮蔽箇所が変化すること等から、樹木と同様に自然と調和したメガソーラ(発電樹林)の建設も可能である。



図2 1/3葉序2段構成疑似FPM

2. 研究の目的

本研究では、従来の単体FPMの検討結果を基に、多数のFPMによる発電樹林の実現に当たって、実験とシミュレーションにより以下の基本的な技術課題を解決することを目的とした。

- (1) 発電樹林を構成するFPMの最適な樹形（葉序、サイズ、形状等）を明らかにする。
- (2) 発電樹林では、FPM自身の他の太陽電池パネルに加えて、隣接FPMの太陽電池パネルの影が発電量に影響する。発電樹林を構成する上で最適なFPM配置パターンを明らかにする。
- (3) 発電樹林では、各FPMやそれを構成する個々の太陽電池パネルの受光条件が異なる。そこで其々の太陽電池パネルに合わせた出力回路等を検討すると共に、太陽電池パネル内セル直並列接続構成と発電量との関係を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 単体FPMの発電量を求めるシミュレーションモデルについては、先に太陽電池パネル相互の影を個々に考慮した解析手法を開発しているが、本研究では、多数のFPM相互の影も取込める手法を新たに開発する。新たなシミュレーション手法により、発電樹林における葉序や形状・寸法、モジュール配置パターンと発電量との関係を明らかにする。日射量データにはNEDOのMETPV-11を用

いる。

(2) 上記シミュレーションで得られる結果を基に、各種太陽電池パネル、実装材料・方法等を検討してFPMを製作し、その特性評価を行う。FPMは、シリコン単結晶太陽電池パネル（8セル直列接続）を用い、ステンレス製の支柱にアングル材を取り付け、太陽電池パネルを固定して構成する。各太陽電池パネルの出力測定には、最大出力点近くで測定する必要があるため、Ni-Cd蓄電池を負荷として用いる。

(3) FPMを構成する太陽電池パネル個々の出力に合わせた出力回路の構成法を検討する。市販低電圧入力DC-DCコンバータの特性を調査すると共に、太陽電池パネル内のセル直並列接続構成と発電量との関係をシミュレーションにより解析する。

4. 研究成果

(1) 隣接FPMの影のかかり方を系統的に把握するため、投影法を用いた発電量推定シミュレーション手法を確立した。シミュレーションでは太陽光を平行光線とし、太陽から見た太陽電池パネルの投影面積を形状化すると共に、それを基に太陽電池パネル相互の影の状況を求める。各太陽電池パネルは3次元空間上の座標に置き換えて表示する。図3にFPMを中心に各季節の太陽軌道と方位座標を示す。

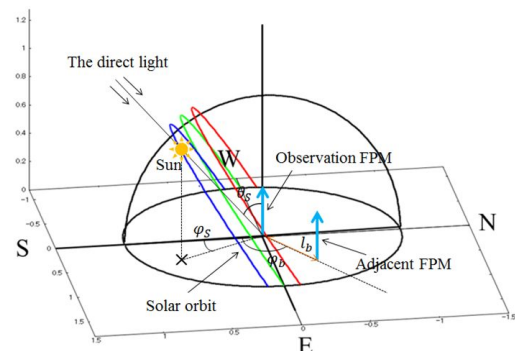


図3 FPMおよび隣接FPMと太陽軌道

シミュレーションは以下の手順による。ある時刻の太陽方位 s と高度 s から太陽座標を決定する。次に隣接 FPM の設置方位 b と間隔 l_b を決める。これらを基に太陽から見える太陽電池パネルの面積と影がかかる面積を求める。図 4 に 1/3 葉序 2 段構成 FPM におけるシミュレーション結果の一例を示す。網掛けの 6 枚のパネルは隣接 FPM のパネルを示す。実践の赤丸部は隣接 FPM による影を、破線の黒丸は自身の他の太陽電池パネルによる影を示す。これらの影を考慮して発電量を推定する。

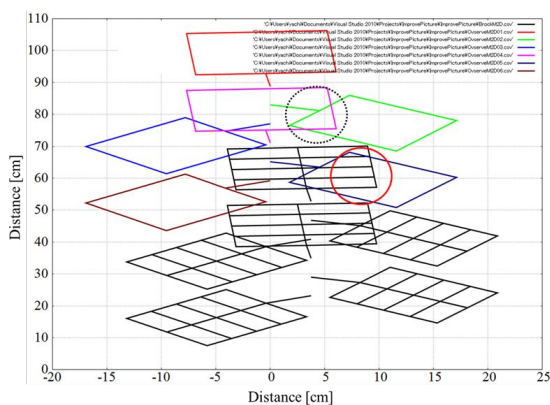


図 4 投影法によるシミュレーション例

(2) 投影法によるシミュレーションを用いて、FPM の年間を通した最適取付け傾斜角を求めた。太陽電池パネルは 1 セル構成と仮定している。求めた最適傾斜角を基に FPM を構成する太陽電池パネルを 10 枚として、1/2、1/3、2/5、3/8 葉序 FPM の年間発電量を求めた。年間発電量の葉序依存性は比較的小さく、影の影響が大きくなる太陽電池パネル面積の大きい FPM では、葉序による差異がほとんどないことが明らかとなった。

また、8 セル構成太陽電池パネルのパネル内直並列構成と年間発電量との関係を求めた。図 5 に 8 セル並列接続時の発電量で規格化した各直並列接続構成の発電量を示す。直列接続数 n の増加と共に発電量は直線的に減少する。減少割合は概ね 1.5n% で示される。一般に入力電圧の小さい DC-DC コンバータ

では効率が低下する。太陽電池パネル出力電圧はセルの直列数に比例するため、DC-DC コンバータを含めた出力では直列数の増加に伴う発電量の低下が緩和される。図 5 に示すように、市販の DC-DC コンバータの効率を加味すると減少量は約半分の 0.75n% となる。

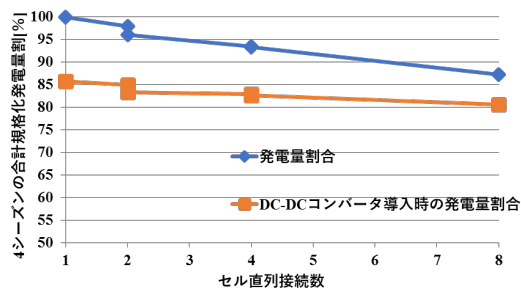


図 5 年間発電量のセル直列接続数依存性

(3) 8 セル直列接続された太陽電池パネルを用いた 1/3 葉序 2 段構成 FPM (図 2) における、隣接 FPM の影の影響による発電量低下の測定結果を図 6 に示す。

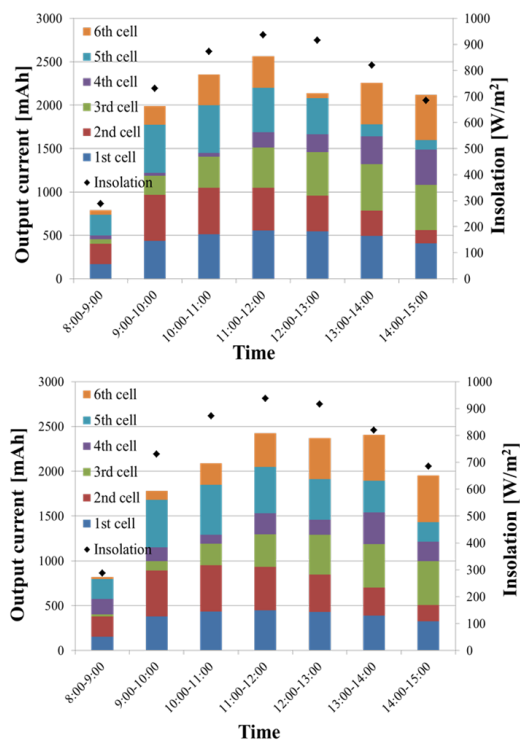


図 6 1/3 葉序 2 段構成 FPM の 1 日の発電量 (上:南方位に隣接 FPM あり、下:単独 FPM)

6枚目の太陽電池パネルは12~13時において、5枚目は13~14時において隣接FPMの影がかかることにより発電量が減少している。この減少量は、6枚目では約85%、5枚目では約60%になる。1日を通して南方位に隣接FPMがある場合、単独設置に比べて約15%発電量は減少する。

FPMでは反射散乱光も利用できるため両面パネル(表裏)を用いることも有効であり、上述のシリコン単結晶パネルを2枚張り合わせた両面パネル1/3葉序2段構成FPMの発電量を測定した。両面パネルでは単面パネル(表)に比べて1.2倍の発電量が得られる。また、日射量に依らず裏面パネル発電量/表面パネル発電量は約20%になる。

(4) 発電樹林を構成するFPMの配置パターンは、稠密になる図7に示す正方形と正六角形を検討した。設置面積当たりの発電量は、中央FPMの発電量をG、FPM同士の最小間隔をaとすると、それぞれ以下の式で与えられる。

$$G_{\text{square}} = 3G/(4a^2)$$

$$G_{\text{honeycomb}} = 4G/(3 - 3a^2)$$

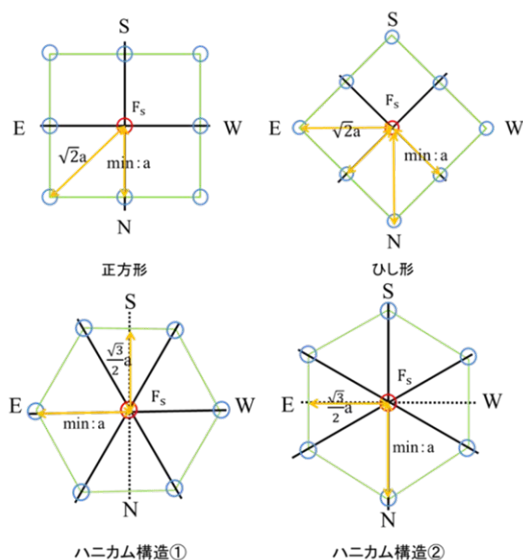


図7 発電樹林におけるFPM配置パターン

単独FPMと比較した各配置における季節毎の発電量を表1に示す。一年を通じて正六

角形で南北に配置するハニカムパターンが最も発電量が多くなる。

表1 各配置パターンの面積当たりの発電量

春分		夏至	
配置パターン	面積あたりの発電量	配置パターン	面積あたりの発電量
正方形	0.562	正方形	0.782
ひし形	0.661	ひし形	0.739
ハニカム構造①	0.654	ハニカム構造①	0.838
ハニカム構造②	0.760	ハニカム構造②	0.917

秋分		冬至	
配置パターン	面積あたりの発電量	配置パターン	面積あたりの発電量
正方形	0.625	正方形	0.753
ひし形	0.703	ひし形	0.562
ハニカム構造①	0.647	ハニカム構造①	0.819
ハニカム構造②	0.761	ハニカム構造②	0.885

引用文献

Trends 2016 in Photovoltaic Applications, Report IEA PVPS T1-30, 2016, Chapter 2
 Yuji Asai, et al., A Novel Photovoltaic Module Assembled Three Dimensionally, The Proceedings of PVSC, 2010, 2811-2816
 須藤利文ほか、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、太陽エネルギー、38巻、2012、47-54
 鈴木聖治ほか、フィボナッチ数列構成による3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-、太陽エネルギー、40巻、2014、45-52
<http://app0.infoc.nedo.go.jp/>, 2017

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計7件)

Akiko Takahashi, Toshihiro Nishiwaki, Toshiaki Yachi, Arrangement of Fibonacci Sequence Photovoltaic Modules for Power Generation Forest, The Proceedings of ICRERA, 査読有、Vol.1, 2016, pp.193-197
 DOI:10.1109/ICRERA.2016.7884536
 Hiroshi Awata, Toshiaki Yachi, Electric Power Leveling of the Microgrid System with PV Power Generation Estimation and Power Demand Estimation, The Proceedings of ICRERA, 査読有、Vol.1, 2016, pp.353-357
 DOI:10.1109/ICRERA.2016.7884359
 Mamoru Shibasaki, Toshiaki Yachi, Power Output Estimation of Cylindrical Flexible PV Modules that Can Be Mounted to a Telecommunication Pole in Green Base Stations, The Proceedings of INTELEC,

査読有、Vol.1、2015、pp.516-520
DOI:10.1109/INTLEC.2015.7572453
柴崎衛、谷内利明、多角形近似による円筒型フレキシブル太陽電池における発電量の推定、電気学会論文誌 B、査読有、Vol.135、No.7、2015、pp.454-461
DOI:10.1541/ieejpes.135.454
Kousuke Mukaiyama、Toshiaki Yachi、Output Power of 1/3-phyllotaxis FPM under Various Stage Shape and Cell Size Conditions、The Proceedings of ICRERA、査読有、Vol.1、2014、pp.122-126
DOI: 10.1109/ICRERA.2014.7016542
Toshihiro Nishiwaki、Toshiaki Yachi、Arrangement of Fibonacci Number Photovoltaic Modules for Power Generation Woods、The Proceedings of ICRERA、査読有、Vol.1、2014、pp.142-146
DOI:10.1109/ICRERA.2014.7016546
Mamoru Shibasaki、Toshiaki Yachi、A Power Generation Estimate of Cylindrically-shaped Flexible PV Cell Systems for Off-Grid Use、The Proceedings of PVSC、査読有、Vol.1、2014、pp.2759-2764
DOI:10.1109/PVSC.2014.6925500

〔学会発表〕(計 31 件)

高橋明子、西脇聡宏、谷内利明、3次元太陽光発電モジュール FPM を用いた発電樹林の構成、電気学会全国大会、2017.3、富山大学(富山市)
市野将真、久保田南輝、谷内利明、3次元太陽光発電モジュール FPM の葉序依存特性、電気学会全国大会、2017.3、富山大学(富山市)
吉田悠佑、谷内利明、3次元太陽光発電モジュール FPM におけるセル傾斜角度の最適化、太陽/風力エネルギー学会合同研究発表会、2016.11、総合コミュニティセンター(松山市)
望月祐希、谷内利明、3次元太陽光発電モジュール FPM 発電量の太陽電池パネル内直並列構成依存性、太陽/風力エネルギー学会合同研究発表会、2016.11、総合コミュニティセンター(松山市)
細川和也、谷内利明、平田陽一、渡邊康之、ソーラーマッピング発電システムにおける発電量推定のための基礎特性の把握、太陽/風力エネルギー学会合同研究発表会、2016.11、総合コミュニティセンター(松山市)
成立洲、谷内利明、ソーラーマッピングハウスにおけるフレキシブル太陽電池発電量推定の一考察、太陽/風力エネルギー学会合同研究発表会、2016.11、総合コミュニティセンター(松山市)
阿波田宙、谷内利明、発電量予測。負荷

需要予測機能を備えたマイクログリッドの電力平準化(2)、電子情報通信学会通信ソサエティ大会、2016.9、北海道大学(札幌市)

阿波田宙、谷内利明、発電量予測。負荷需要予測機能を備えたマイクログリッドの電力平準化、電子情報通信学会・電子通信エネルギー技術研究会、2016.5、機械振興会館(東京都)

西脇聡宏、高橋明子、谷内利明、発電樹林の実現に向けた3次元太陽光発電モジュール FPM の構成法、電気学会・家電民生技術委員会、2016.5、機械振興会館(東京都)

渡部拓巳、阿波田宙、谷内利明、気象情報を基にした太陽光発電量の予測法、電気学会全国大会、2016.3、東北大学(仙台市)

前多竜馬、谷内利明、太陽追尾ミラーを備えた太陽光発電システムの発電特性、電気学会全国大会、2016.3、東北大学(仙台市)

高橋明子、谷内利明、3次元太陽光発電モジュール FPM のタンデムモジュールに関する考察、電気学会全国大会、2016.3、東北大学(仙台市)

吉田悠佑、谷内利明、3次元太陽電池モジュール FPM におけるセル傾斜角度の最適化、電気学会全国大会、2016.3、東北大学(仙台市)

何其偉、谷内利明、両面 PV パネルを用いた1/3葉序2段構成 FPM の発電特性、電気学会全国大会、2016.3、東北大学(仙台市)

斐恵珍、柴崎衛、谷内利明、ドーム型フレキシブル太陽電池における発電量の推定法、電気学会全国大会、2016.3、東北大学(仙台市)

西脇聡宏、谷内利明、発電樹林に向けた3次元太陽光発電モジュール FPM の配置、太陽/風力エネルギー学会合同研究発表会、2015.11、ニューウェルシティ宮崎(宮崎市)

Toshiaki Yachi、Some Tries for Development of Future Photovoltaic Systems、ICRERA、2015.11、Palermo (Italy)

他 14 件

〔その他〕

ホームページ等

http://www.tus.ac.jp/fac_grad/p/index.php?3b65

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷内 利明 (YACHI, Toshiaki)

東京理科大学・工学部第二部電気工学科・教授

研究者番号：90349845