

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560340

研究課題名(和文) フィボナッチ数列を基にした3次元太陽光発電モジュール構成法

研究課題名(英文) Three-Dimensional Photovoltaic Modules Using Fibonacci Numbers

研究代表者

谷内 利明 (Yachi, Toshiaki)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：90349845

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光エネルギーの最大限の利用を図るため、植物の葉序に倣った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FPMを提案し、その特性を計算機シミュレーションおよび実機によるフィールドテストで明らかにした。計算機シミュレーションでは、セル同士の影の影響も考慮した発電量算出モデルを新たに構築した。また、実機は方形の単結晶シリコン太陽電池を用いた疑似FPMとした。1/3葉序FPMでは、2段構成にすることで従来の平面型モジュールに比較して設置面積当たりで1.5倍の発電量が得られる。また、2段構成FPMでは、1段目と2段目の太陽電池セルサイズを同一にしたときが最も設置面積当たりの発電量が多い。

研究成果の概要(英文)：For increasing power generation in an installation area, it has been proposed three-dimensional photovoltaic module using Fibonacci numbers (FPM: Fibonacci numbers Photovoltaic Module). FPM power generation characteristics have been studied by the computer simulation considered influence of a shadow and the field test devices with the single crystalline silicon solar cells. It is shown that the power generation in an installation area of the FPM with double stages is 1.5 times that of a conventional planar module. In the FPM with double stages, it is given the most power generation when the second stage cell size is the same of the first stage one.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：太陽光発電 太陽エネルギーの利用向上 再生可能エネルギー 植物の葉序 フィボナッチ数列

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化、福島原子力発電所の事故などを受け、再生可能エネルギーへの期待が高まっている。再生可能エネルギー技術の中でも特に太陽光発電システムは、無尽蔵に降り注ぐ太陽光を利用し、発電に伴う排出物がなく、かつ回転部などの駆動部がなくメンテナンスフリーでもあるため、その普及拡大が大いに期待される。日本では、サンシャインプロジェクトから継続して NEDO などの技術開発施策により、太陽光発電システムの技術開発では世界をリードしてきた。さらに、政府は、Cool Earth エネルギー革新技術ロードマップを作成し、2030 年までに太陽光発電による電力の料金を火力発電と比較しても遜色のない 7 円/kWh にすることを目標としている。ここ数年、固定価格買取制度 (FIT: Feed-in Tariff) の導入普及もあり、太陽光発電システム設置容量はヨーロッパを皮切りに指数関数的に増大し、これに伴う量産規模の拡大を背景に太陽電池パネルのコストも予測以上の低下を見せている。

(2) 太陽光発電システムは、太陽電池パネル、接続箱、パワーコンディショナー、分電盤などから構成される。太陽光発電システムでは、太陽電池セルがまだまだ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。一方、朝夕の日射を有効に利用するため太陽パネルを駆動する集光型太陽光発電システムでは、その駆動部の消費エネルギーが問題となっている。そこで、太陽電池セル低価格の進展に合わせて、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る。このような取り組みは今までほとんど見られず、無線通信システム用に検討された円筒型太陽光発電モジュール等があるだけである。

(3) 無線基地局の独立型給電システムとして検討された円筒型 3 次元太陽光発電モジュールの一例では、長方形の太陽電池パネルを 10 方位に円筒状に並べ 1 段を構成し、電柱に沿って垂直に 12 段設置されている。方位ごとに DC-DC コンバータを設置し、時分割で最大出力点追従制御 (MPPT: Maximum Power Point Tracking) を行っている。太陽電池パネルの傾斜角が 90 度であるため、最大電力を示す方位は南方位ではなく少し東あるいは西に向いた方位となる。また、北方位の太陽電池パネルは、直達光が届かないため散乱光による発電のみとなる。この円筒型 3 次元太陽電池モジュールでは、設置面積に応じた最大限の発電量が得られているとは言い難く、より効率的な発電が可能な 3 次元太陽光発電モジュールの開発が待たれる。

(4) 自然界での太陽光の利用として最も身近には光合成が挙げられる。直物は、葉を立体的に繁らせて、葉の中の葉緑素で太陽光の光エネルギーを吸収して化学エネルギーとして蓄えている。葉は互いに重ならないようにある角度 (開度) を持って順次茎に付いている。直物の葉の付き方を葉序といい、葉序がフィボナッチス数列 ($F_{n+2}=F_n+F_{n+1}; 1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 8 \ 13 \dots$) に基づくことは良く知られている。1/3 葉序、2/5 葉序、3/8 葉序 (F_n/F_{n+2}) などで表され、分子 (F_n) は同一方向に葉が生じるまでの周回数を、分母 (F_{n+2}) はそれまでの葉の枚数を示す。したがって開度は 1/3 葉序では $120^\circ (360^\circ \div 3)$ 、2/5 葉序では $144^\circ (360^\circ \times 2 \div 5)$ となる。太陽光

発電システムも植物の葉序に倣って構成することで太陽光の最大限の利用が期待される。

2. 研究の目的

(1) 太陽光エネルギーの最大利用を図るため、設置面積当たりの発電量を最大にする 3次元太陽光発電システム FPM (Fibonacci Number Photovoltaic Module) を実現する。FPM は支柱に扇形の太陽電池パネルを葉序に倣って取り付け構成する。例えば図1に示す 3/8 葉序の FPM では、最上部の太陽電池パネルを北方位としたとき、2 枚目を上から見て時計回りに 135° 回転した南東方位に、垂直方向にある間隔をあけて取り付け、順次西方位、北東方位、南方位、北西方位、東方位、南西方位に取り付ける。各方位の太陽電池パネルの傾斜角はその方位で最も発電量が多くなる角度に設定する。

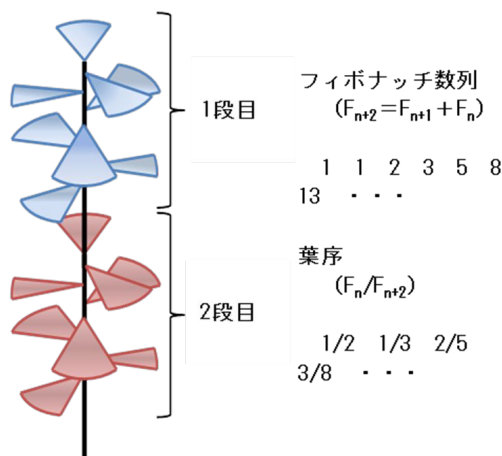


図1 3/8 葉序 FPM の模式図

(2) FPM を実現するため、以下の具体的な技術課題を解決する。

太陽光発電モジュールの3次元化に当たっては、葉序や形状、モジュール寸法等と発電量の関係を体系的に明らかにし、最適形状・寸法を求める。

モジュールの設置に当たっては、上部パネルによる下部パネル上の影の影響や反射光の影響などを体系的に求め、モジュール段数や相互の設置間隔等を決定する。

3次元太陽光発電モジュールでは、個々の太陽電池セルの受光条件が異なるため、其々の太陽電池セルに合わせた負荷条件に設定する制御法やインバータを含む出力回路等を明らかにする。

シミュレーション結果に基づいて FPM の作製を進め、その特性をフィールド試験で明らかにする。

3. 研究の方法

(1) FPM における葉序や形状、モジュール寸法等と発電量の関係を体系的に明らかにするため、FPM の発電量を算出するシミュレーション手法の確立を進めた。シミュレーションモデルの構築においては、上部パネルによる下部パネル上の影や支柱による影の影響なども取り込んだ。

(2) シミュレーション結果に基づいて FPM の作製を進め、その特性をフィールド試験で明らかにした。FPM の作製に当たっては、現状実現されていない扇型セルに代えて方形単結晶シリコン太陽電池パネルを用いた。太陽電池パネルは、8セルが直列接続されており、開放電圧は 4.8V、短絡電流は 0.53A、最大出力は 2W である。1/3 葉序および 3/8 葉序疑似 FPM を作製し、その支持材料や接続法等の実装条件も明らかにした。発電特性は負荷に Ni-Cd バッテリーを用い、動作電圧 2.4V における発電電流を比較することで求めた。

(3) 個々の太陽電池セルの受光条件が異なる FPM 其々の太陽電池セルに合わせた負荷条件に設定する制御法やインバータを含む出力回路の実現に向け、太陽電池セルの低電圧入力でも動作する電源制御 IC の選定を行った。また、太陽電池セルでの反射光の強度やスペクトルを測定して、そのスペクトルに合った各種太陽電池セルを混在して用いるタンデム型モジュールの実現性を検討した。

4. 研究成果

(1) 3次元太陽光発電モジュールの発電量を推定するため、各太陽電池セルへの影の影響も含めた発電量を算出するシミュレーション手法を確立した。本シミュレーションでは、直達光のみを対象として下部パネル上に投影される上部パネルの影の面積などを算出し、影のかからない面積でのみ発電するとして発電量を求めた。

(2) シミュレーションによる発電特性の一例として、1/3葉序2段構成FPMの各太陽電池パネル間の影も考慮した発電特性を図2に示す。直径1mの太陽電池パネルを3分割してFPM各1枚の太陽電池パネルとし、1段当たりの高さを1mと仮定している。設置場所は東京で、季節は春分頃とした。従来の平面構成の太陽光発電モジュールに比較して、1段目では84%、2段目では66%の発電量となるが、1段目と2段目を合計した値は設置面積当たりで従来の平面配置の1.5倍になる。

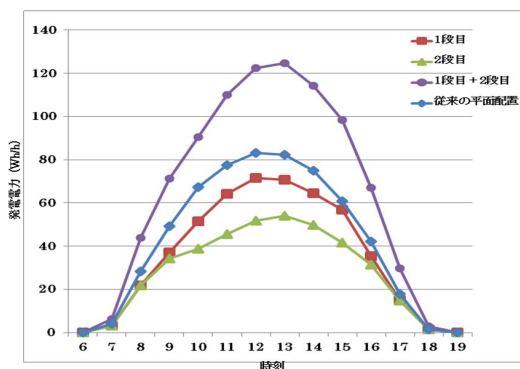


図2 1/3葉序2段構成FPMの発電特性

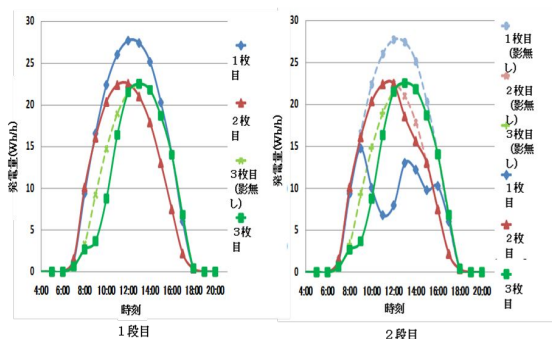


図3 1段目および2段目各セルの発電特性

図2における1段目、2段目各太陽電池パネルの発電特性を図3に示す。1段目では3枚目のパネルのみが午前中に上部パネルの影により発電量が低下する。一方、2段目では1枚目が日中長時間にわたって1段目1枚目の影による影響を受け、2枚目が午後、3枚目が午前中に上部パネルの影の影響を受ける。上部パネルの影の影響は1段当たりの高さを広げることで抑制でき、3mにするとほぼ解消される。なお、同様の結果は3/8葉序FPMでも得られた。また、支柱の影の影響は上部パネルによる影の影響に比較して小さく2%程度であることが示された。さらに、太陽電池セルサイズは、1段目と2段目を同サイズとしたときが最も設置面積当たりの発電量が多くなる。

(3) シミュレーションで求めた条件に合わせて製作した1/3葉序2段構成の疑似FPMを図4に示す。太陽電池パネルには市販されている方形(13cm×13cm)の単結晶シリコン太陽電池を用いている。



図4 1/3葉序2段構成疑似FPM

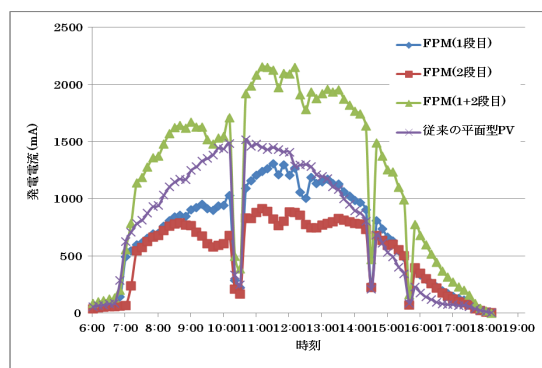


図5 1/3葉序2段構成疑似FPMの発電特性

図5に1/3葉序2段構成疑似FPMの1日の発電特性を示す。各太陽電池パネルの間隔は10cmで、1段あたりの高さは30cmになる。測定は2012年8月26日に東京で行い、測定時間間隔は10分とした。平面配置に比較して1段目では88%、2段目では67%の発電量となるが、1段目と2段目を合計した値は設置面積当たりで従来の平面配置の1.5倍になる。この結果は、図2で示したシミュレーションによる結果とほぼ一致する。なお、午前中1回、午後2回の急激な電流量の低下は雲の影による。また、1段目パネルではシミュレーション結果と同様に3枚目の太陽電池パネルの出力が午前中大幅に低下する。太陽電池単セルの出力は日射を受けた面積に比例し、単セルが直列に接続された太陽電池パネルでは、最小出力の単セルの特性で太陽電池パネル全体の出力が決定される。このため、太陽電池パネルが8単セル直列で構成されている疑似FPMでは、シミュレーションに比べて影の影響が顕著となる。2段目の3枚の太陽電池パネルもシミュレーションと同様の影の影響による出力の低下がみられる。

(4) セル設置位置のスペクトルに合った吸収スペクトルを持つ太陽電池を組み合わせて配置するタンデム型FPM実現の第一歩として、シリコン系太陽電池の反射光特性を求めた。各太陽電池とも入射角にあまり大きく依存せず、20%程度の反射光があることが明らかとなった。また、反射光のスペクトルにも大きな相違は見られない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7件)

鈴木聖治、谷内利明、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、太陽エネルギー、査読有、40巻、2014、45-52
ISSN 0388-9564
Jun Hu、Toshiaki Yachi、Photovoltaic

Systems with Solar Tracking Mirrors、Proceedings of 2013 ICRERA、査読有、1巻、2013、201-204

ISBN 978-1-4799-1464-7

胡俊、谷内利明、太陽追尾ミラーを備えた太陽光発電システム、信学技報、査読無、113巻、2013、5-8

ISSN 0913-5685

鈴木聖治、谷内利明、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、信学技報、査読無、113巻、2013、9-14

ISSN 0913-5685

谷内利明、3次元太陽光発電モジュール、科学フォーラム、査読無、345巻、2013、14-17

ISSN 1346-1206

鈴木聖治、李多陽、谷内利明、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、信学技報、査読無、112巻 No.60、2012、23-28

ISSN 0913-5685

須藤利文、鈴木聖治、谷内利明、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、査読有、38巻、2011、47-54

ISSN 0388-9564

〔学会発表〕(計 18件)

Seiji Suzumoto、Toshiaki Yachi、Output Power Characteristics of Three-Dimensional Photovoltaic Module Using Fibonacci Numbers、39th IEEE PVSC、2013.6、Tampa Bay Convention Center
加藤崇夫、鈴木聖治、谷内利明、3/8葉序疑似FPMの発電特性、日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2013.11、沖縄県市町村自治会館

向山康介、谷内利明、FPMにおける影の影響の太陽電池セルサイズ依存性、日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2013.11、沖縄県市町村自治会館

柴崎衛、山口雄一、谷内利明、フレキシブル太陽電池における出力回路モデルの検討、日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2013.11、沖縄県市町村自治会館

山口雄一、柴崎衛、谷内利明、円筒曲面に設置した球状シリコン太陽電池の発電特性、日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2013.11、沖縄県市町村自治会館

胡俊、谷内利明、太陽追尾ミラーを備えた太陽光発電システム、日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2013.11、沖縄県市町村自治会館

Seiji Suzumoto、Lee Tayo、Toshiaki

Yachi, Output Power Characteristics of a Three-Dimensional Photovoltaic Module Using Fibonacci Number Composition, IEEE 34th INTELEC, 2012.9, Talking Stick Resort Scottsdale
Kouji Tsuboi, Takayuki Matsuoka, Toshiaki Yachi, An Output Degradation of Photovoltaic Module by Fine Particles Deposition, ICRERA, 2012.11, Best Western Premier Hotel Nagasaki
Toshifumi Suto, Toshiaki Yachi, Power-Generation Characteristics of an FPM by Simulation with Shadow-Effect Analysis, IEEE 37th PVSC, 2011.6, Seattle

Junichiro Saito, Hiromi Sasaki, Toshiaki Yachi, Degradation of Photovoltaic Module Output Power by Micro particles, IEEE 37th PVSC, 2011.6, Seattle

須藤利文、浅井裕二、谷内利明、FPM を用いた太陽光発電システムの影による出力低下の解析、電気学会・家電民生研究会、2011.5、機械振興会館 東京

須藤利文、野原康平、谷内利明、FPM を用いた太陽光発電システムの影による出力低下の解析、日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2011.9、稚内総合文化センター
他 6 件

〔図書〕(計2件)

谷内利明 他、(株)秀和システム、良く分かる太陽光発電の基本と仕組み、2013、202

谷内利明 他、(株)秀和システム、良く分かる太陽電池の基本と仕組み、2013、219

〔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・教授

研究者番号：9 0 3 4 9 8 4 5