

平成 27 年 4 月 26 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580370

研究課題名(和文) シースルー太陽電池モジュールを用いたガラス温室太陽光発電システム

研究課題名(英文) Semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications

研究代表者

谷野 章 (Yano, Akira)

島根大学・生物資源科学部・教授

研究者番号：70292670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：まず、直径1.8 mmの球状Si太陽電池(PV)を用いた小型シースルーPVモジュールの特性を試験した。このモジュールは全方位からの入射光で発電するので、天空からの日射と地面や作物で反射した日射の両方を発電に利用できる。次に、小型モジュールの実験データを根拠として、直径1.2 mmの球状SiPVを用いた910 x 610 mmの大型シースルーモジュールを開発した。このモジュールをガラス温室西屋根面にはめ込み、発電量および遮光量を計測した。温室全体にモジュールを拡張したと仮定し、発電量と遮光量を計算した。本モジュールで運転可能な温室負荷の実例も示した。得られた成果を関連学会および学術誌で発表した。

研究成果の概要(英文)：A prototype photovoltaic (PV1) module using 1500 spherical solar micro-cells having 1.8 mm diameter with 15.4 cells cm<sup>-2</sup> density in 97 mm<sup>2</sup> area was developed for greenhouse roof applications. The electrical and shading characteristics of the PV1 module were measured and evaluated. Subsequently, a larger (910 mm x 610 mm) semi-transparent PV module (PV2) was developed matching the size of greenhouse roof frames. PV2 was produced using 4800 spherical solar micro-cells with 1.2 mm diameter. The sunlight eclipsing percentage of the cells was 9.7%. The electrical and shading characteristics of the PV2 module were measured and evaluated. The performances and possible applications of the PV1 and PV2 modules were reported at scientific meetings and journals.

研究分野：植物環境フォトンクス

キーワード：再生可能エネルギー 太陽光発電 温室

### 1. 研究開始当初の背景

温室栽培では、温室内の環境を適切に制御することにより、栽培時期の調節、栽培日数の短縮、栽培回数の増大、ひいては収量の増大、品質の向上を計ることができる。ところが、その環境制御のための設備で化石燃料や電気エネルギーが消費されるので、近年我々が経験しているような原油価格の高騰は温室栽培に負の影響を及ぼす。加えて、特に2011年以降、節電は国民的懸案であり、温室栽培も例外ではない。温室栽培では、圧倒的な利便性から電気エネルギー(物体の搬送、照明、冷暖房、および計測・通信・制御のいずれにも利用可能)が駆使される傾向があり、その使用量は増え続けている(Ozkan et al., 2004)。したがって、今後、温室栽培の利点を維持または拡大しつつ、環境制御で消費される電気エネルギー量を減じること、さらにその一部(できれば全部)を再生可能エネルギーで賄うことは、持続可能な温室栽培のために重要な目標となりうる。本研究は、温室が存在する場所で得られる太陽光から太陽電池を用いて電気エネルギーを生産することを大きな目標としている。これまでも、温室の環境制御で消費される電力の一部またはすべてを、その場で得られる太陽光発電エネルギーで賄うための研究は各国で行われてきた(杉浦ら, 2002; 谷野ら, 2005; Yano et al., 2007, 2009, 2010; Rocamora and Tripanagnostopoulos, 2006; Sonneveld et al., 2010a, 2010b, 2011)。これらのうち、本申請の着想に特に強く影響した研究について説明する。谷野ら(2005)やYano et al. (2007)は、わずか $0.078 \text{ m}^2$ の太陽電池(3.2 W)で発電した電気エネルギーによって、温室の側窓を自動開閉するシステムを開発した。このシステムは後に製品化され、実際に我が国の中山間地などの無電源地域の温室で、作業負担軽減につながるとして受け入れられた。この成果を受け、太陽電池の面積を拡大し、他の様々な環境制御機器の電源としても活用することが期待されたが、温室の屋根面や壁面に太陽電池を設置することにこだわるのであれば、太陽電池面積の拡大は作物にかかる影を拡大させ、生産量低下につながるものが自明であった。それにもかかわらず、Yano et al. (2010)は屋根面積比で13%を占める大規模な太陽電池アレイ(“アレイ”とは“モジュール”を複数連結したものの、“モジュール”とは太陽電池の最小単位である“セル”を複数内部で結合してパッケージにしたものである。以下、この定義により記述する)を東西棟単棟温室の南屋根面に設置し、得られる電力と温室内で失う日射の関係を詳細に研究した。その結果、東西方向に一直線に太陽電池アレイを配置すると、数ヶ月にわたって温室内の同じ位置に太陽電池アレイの影がかかり続けるのに対し、太陽電池モジュール同士の間隔を空けてストライプやチェック状に配置すると、直線配置の場合と同等の発電量を得られ

つ、日中連続して太陽電池アレイの影がかかる位置はなくなり、温室内の光分布はより一様になることが明らかとなった。しかも、そのストライプやチェックが細かいほど、作物に連続して太陽電池アレイの影がかかる時間が短縮されると予想された。そこで、本研究では、直径が僅か1.8 mmの粒状(球状)太陽電池セルを温室屋根面に分散配置して、作物に照射されるべき日射をほとんど遮ることなく適度な電気エネルギーを得ることを目指す。適度な電気エネルギーとは、現在温室で消費されている電気エネルギー消費量を一定程度賄う量を想定しており、定量的には本研究で明らかにする。

### 2. 研究の目的

粒状太陽電池セルの設置密度と遮光および発電量の関係を計算する方法を確立する。粒状太陽電池セルを用いてシースルーモジュール(向こう側が見える太陽電池モジュールはシースルーモジュールと呼ばれる)をガラス温室のガラス1枚のサイズで試作する。そのモジュールを温室屋根にはめ込み、発電エネルギーおよびモジュール下の影を実測して計算値と比較する。実測値に基づいて計算式の補正を行い、実規模のガラス温室の全面または特定の面にシースルーモジュールを配置した場合の発電エネルギーと温室内部日射を計算する。そして、作物生産量と発電エネルギー量の妥当なバランスを明らかにする。具体的に、ある太陽電池セル密度でどんな負荷を1日何時間運転させられるかについても明確にし、農業経営者にもわかりやすい提示をする。

### 3. 研究の方法

(1) 粒状太陽電池セルの設置密度と発電エネルギーおよび遮光量の関係の計算  
屋外の太陽光下では、粒状太陽電池セルの明半球には直達光 + 散乱光が入射し、暗半球には散乱光のみが入射する。これらの入射光の放射照度と明側、暗側それぞれのセル表面積との積に発電効率を乗じて電力を算出する。さらに、セルの設置密度(個/ $\text{m}^2$ )を乗じてモジュール $1 \text{ m}^2$ あたりの電力を求める。電力を光照射時間で積分すれば発電エネルギーが算出される。これらの計算では、全日快晴を仮定し、入射光の方向と強度を決定する太陽の軌道を時間精度1分で1年間にわたって計算する。なお、太陽電池セルから見た太陽軌道の計算プログラムは申請者がYano et al. (2009, 2010)で平板太陽電池用に開発したものを利用する。直径1.8 mmの太陽電池セルを温室屋根面に分散配置した場合に、温室内の任意の地点の植物が受ける日射を計算する方法を確立する。セルの直径は太陽の視直径より小さいため、温室屋根にある太陽電池セルが、植物から見た太陽を覆い隠すことはない。植物から見た太陽と太陽電池セルが重なる時、植物が受ける直達光の放射照度は

植物から見た  $i$  番目の太陽電池セルの見かけの断面積、太陽の見かけの断面積、および太陽電池がない場合の直達光の放射照度から算出可能である。この値は、太陽電池セルと植物の間の距離  $r$  (太陽電池セルの見かけの断面積に影響する) および太陽電池セル密度の関数となる (密度が濃いと太陽の前に複数のセルが入り込む)。次に、全方位から植物に到達する散乱光は植物から見た全天空に対するすべての太陽電池セルの見かけの断面積の割合で決まるので、やはり植物から全太陽電池セルまでの距離とセル密度の関数となる。温室内の植物が受けるこれらの直達光と散乱光の和を、年間にわたって時間精度 1 分で計算する。

#### (2) 粒状太陽電池を用いた小型シースルーモジュールの評価

直径 1.8 mm の粒状 Si 結晶太陽電池セル (スフェラー<sup>®</sup>、京セミ株式会社) (Biancardo et al., 2007) を用いて作成した 100 cm<sup>2</sup> 程度の小型のシースルーモジュールの特性を評価する。この太陽電池セルは p 型半導体の内球と n 型半導体の外殻から構成され、それぞれに接触する電極から電力を取り出す構造である (Taira and Nakata, 2010)。太陽電池セル 1 粒では標準日射条件で 0.5 V、1 mA の出力が得られるので、多数のセルを導線で直並列接続してモジュールが構成される。このモジュールは両面からの入射光で発電するので、温室屋根面への装着を考えたとき、天空からの日射と地面や作物で反射した日射の両方を発電に利用できるという大きなメリットがある。この太陽電池セルは可視光～近赤外で発電するため、地面や植物で反射した後の長波長寄りの光も有効に電力に変換する。このことは、東西棟の北屋根面で発電するとき、特に有利な特性である。自然光下で発電実験を行い、計算値と比較する。この基本データを翌年試作する実規模モジュールの設計基準とする。

#### (3) 改良大型シースルーモジュールの試作とガラス温室への装着および発電量と遮光量の計測

小型モジュールの実測データおよびシミュレーション結果を根拠として、適切なセル密度を決定し、ガラス温室のガラス 1 枚分に相当する 0.5 m<sup>2</sup> 規模のシースルーモジュールを試作する。このモジュールをガラス温室にはめ込み、実際のガラス温室で発電量および遮光の年間実測データを得る。

#### (4) 実測値に基づく計算式の補正

導出した計算式と改良シースルーモジュールの実測値を比較して計算式の補正を行う。具体的には、日射の大気透過率およびガラス透過率、直達光のモジュールへの入射角度特性、アルベドなどが主な補正係数になる。

#### (5) 実規模ガラス温室への計算の拡張

温室全体または特定の面にシースルーモジュールを拡張したと仮定し、発電量と遮光量の瞬時および年間積算値を計算する。この時、温室の形状、向き、立地緯度をパラメータとする。温室の冷暖房機、ポンプ、ファン、照明などの負荷を 1 日あたり何時間運転できるかという実例も示す。

#### < 文献 >

- Biancardo et al. 2007 Solar Energy 81, 711-716.  
Ozkan et al. 2004 Biomass and Bioenergy 26, 89-95.  
Rocamora and Tripanagnostopoulos 2006 Acta Horticulturae 719, 239-245.  
Sonnevelt et al. 2010a Biosystems Engineering 105, 51-58.  
Sonnevelt et al. 2010b Biosystems Engineering 106, 48-57.  
Sonnevelt et al. 2011 Solar Energy 85, 432-442.  
杉浦ら 2002 農業機械学会誌 64(6)128-136.  
Taira and Nakata 2010 Nature Photonics Technology Focus 4, 602-603.  
谷野ら 2005 農業機械学会誌 67(2)100-110.  
Yano et al. 2007 Biosystems Engineering 96, 633-641.  
Yano et al. 2009 Biosystems Engineering 103, 228-238.  
Yano et al. 2010 Biosystems Engineering 106, 367-377.

#### 4. 研究成果

##### (1) 粒状太陽電池セルの設置密度と発電エネルギーおよび遮光量の関係の計算

太陽電池モジュールあたりの電力を計算で求めた。電力を光照射時間で積分して発電エネルギーを算出した。次に、粒状太陽電池セルを温室屋根面に分散配置した場合に、温室内の任意の地点の植物が受ける日射を計算する方法を考案した。特定のモデル温室に特定の密度で太陽電池セルを分散配置する場合に、温室内の植物が年間にわたって受ける直達光と散乱光の和を計算した。

##### (2) 粒状太陽電池を用いた試作小型シースルー太陽電池モジュールの評価試験

直径 1.8 mm の粒状 Si 結晶太陽電池セルから成る 97 cm<sup>2</sup> の小型のシースルー太陽電池モジュールの特性評価試験を実施した。試作小型太陽電池モジュールを用いて自然光下で発電実験を行い、測定値を計算値と比較した。

##### (3) 粒状太陽電池を用いた大型シースルー太陽電池モジュールの試作と評価試験

小型モジュールの実測データおよびシミュレーション結果を根拠として、適切なセル密度を決定し、直径 1.2 mm の球状シリコン PV セルを 4800 粒使用してガラス温室のガラス 1 枚分に相当する 910 × 610 mm の大型シースルー太陽電池モジュールを試作した。このモジュールを島根大学敷地内 (北緯 35°29'、東

経 133°04')のガラス温室西屋根面にはめ込み、実際のガラス温室で発電量および遮光量を計測した。屋根の傾斜は 26.5°、地上高は 3 m であった。また、ガラス温室の長辺は南北線に対し西に 6°ずれていた。電流-電圧特性を直流電圧・電流源/モニタにより 1 分毎に計測した。水平面全天日射をガラス温室天頂(地面からの高さ 3.5 m)に設置した日射センサーで 1 分毎に計測した。傾斜面全天日射、傾斜面地上散乱日射、太陽電池モジュールのセルの影部分の傾斜面全天日射、および太陽電池モジュールのガラス部分を通過した傾斜面全天日射を、それぞれ日射センサーで 1 分毎に測定した。直流電圧・電流源/モニタおよび各日射センサーは GPIB によりパソコンと接続し、全てのデータは 1 分毎にパソコンに蓄積した。

(4) 実測値に基づく計算式の補正  
導出した計算式と改良大型シースルーモジュールの実測値を比較して計算式の補正を行った。しかしながら、実測値に説明困難な誤差があり、この原因を調べたところ、日射センサーの応答速度が遅いことが問題であることがわかった。そこで応答速度の速いフォトダイオードタイプの日射センサーを使用して実験をやり直した。大型シースルーモジュールのセル断面積と導線部分がモジュールに占める割合は 9.7%であった。ガラスと樹脂から成るモジュールの母材による散乱も含む実測の光透過率は 73%であった。

(5) 実規模ガラス温室への計算の拡張  
温室全体または特定の面にシースルーモジュールを拡張したと仮定し、発電量と遮光量の瞬時および年間積算値を計算した。この時、温室の形状、向き、立地緯度をパラメータとした。どの程度の規模の温室の冷暖房機、ポンプ、ファン、照明などの負荷を運転できるかという実例も示した。セル密度が高かった小型モジュールでは、南欧の多日射地帯の温室の全電力消費量を賄う発電量が得られると試算された。光透過率を向上させた低セル密度の大型モジュールでは、温室の負荷の運転を賄うには不十分であることが明らかとなった。

(6) 得られた成果を関連学会および学術誌で発表した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Akira Yano, Mahiro Onoe, Josuke Nakata. (2014) Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. *Biosystems Engineering* 122:62-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.04.003>. (査読有)。

谷野 章. (2014) 太陽電池を用いた独立電源型温室環境制御の可能性. *農業食料工学会関西支部報* 第 115 号, pp.5-7. (査読無)。

谷野 章. (2013) 園芸施設における太陽光発電利用. *施設と園芸* 160, pp.30-33. (査読無)。

〔学会発表〕(計 4 件)

谷野 章, 李 治, 尾上真広, 中村英稔, 松本利則, 中田仗祐. (2014) 温室ガラスサイズの半透過型太陽電池モジュールの開発. 日本生物環境工学会 2014 年大会, 9 月 10 日, 明治大学(東京・神田)。

Akira Yano, Mahiro Onoe, Josuke Nakata. (2014) Development of semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. IHC2014, SYM22 New Technologies in Protected Cultivation. 19 August, Brisbane (Australia)。

尾上真広, 土井將成, 勝股泰徳, 谷野 章, 中田仗祐. (2013) 温室での利用を目指した 2 種類のシースルー型太陽電池モジュールの基本特性. 日本生物環境工学会 2013 年大会, 9 月 5 日, 香川大学(香川・高松)。

Akira Yano, Josuke Nakata. (2013) Prototype of semi-transparent photovoltaic module for greenhouse roof applications. PIERS 2013 Stockholm. 14 August, Stockholm (Sweden)。

〔図書〕(計 1 件)

谷野 章. (2012) 太陽光利用. よくわかる農業施設用語解説集, 農業施設用語解説集編集委員会編, 筑波書房, pp. 143-144. ISBN978-4-8119-0408-5

〔産業財産権〕

- 出願状況(計 0 件)
- 取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.04.003>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷野 章 (YANO, Akira)

島根大学・生物資源科学部・教授

研究者番号: 70292670