

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07667

研究課題名(和文) 受光角度を自律制御するエネルギー自給型の温室用半透過太陽電池ブラインドシステム

研究課題名(英文) Prototype greenhouse blind-type shading system using a semi-transparent photovoltaic module

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：受光角度を自律制御するエネルギー自給型の温室用半透過太陽電池ブラインドシステムを開発した。日射に応じた自律的なブラインド角度制御を可能とする電子回路を開発した。温室屋根に装着した太陽電池ブラインドの動作に要するエネルギーは自己の発電エネルギーで自給した。日射が強い時には屋根と平行に、弱いときは屋根と垂直にブラインドの角度を変えることにより、発電と温室内部への日射取り込みのバランスを調節した。システムの性能を一通り評価した後、太陽電池ブラインド板を1枚追加した。2ヶ月間に渡る自律動作試験において、発電エネルギーはブラインドを運転するために消費したエネルギーを上回り、余剰電力量が発生した。

研究成果の概要(英文)：This study prototyped a greenhouse venetian-blind-type shading system using a semitransparent photovoltaic (PV) module as a blind blade. An electronic control circuit was developed to regulate the PV module inclination autonomously according to solar irradiance. The prototype PV blind installed on a test greenhouse roof was operated using electricity provided by the PV blade itself. In times of intense solar irradiance, the PV module was oriented parallel to the roof. When the irradiance was less than a predetermined threshold value, the module was oriented perpendicular to the roof, prioritizing the sunlight intake into the greenhouse. After evaluating the system performance, an identical PV module was added on the common rotation axis of the original PV module to increase the electrical energy productivity. The energy balance of the twin blind operation was recorded continuously for two months. The system's cumulative net energy became positive at the end of the operation test.

研究分野：植物環境フォトニクス

キーワード：温室 再生可能エネルギー 太陽光発電 遮光

### 1. 研究開始当初の背景

温室栽培では、室内環境を適切に制御することによって、作物の収量や品質を向上させることができる。また、屋外環境では栽培が困難な季節や地域での栽培が可能となる。ところが、その環境制御設備を運転するために化石燃料や電力が消費されるので、原油および電力価格の変動が温室栽培の経営を不安定にする。送液、搬送、照明、空調、および情報通信のいずれにも利用可能であるという利便性により、温室での電気エネルギー使用量は増える傾向がある (Ozkan et al., 2004)。したがって、温室栽培の環境制御で消費される電気エネルギー量を減らすこと、さらにその一部またはすべて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る。本研究は、温室が存在する場所で太陽光発電を行い、電気エネルギーを生産して、温室の環境制御に活用することを大きな目標としている。

特に 2000 年以降、温室の電力需要量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が各国で行われてきた (谷野ら, 2005; Yano et al., 2007, 2009, 2010; Rocamora and Tripanagnostopoulos, 2006; Sonneveld et al., 2010a, 2010b, 2011)。申請者の研究グループは、わずか 3.2 W のアモルファスシリコン太陽電池と 28 Ah の自動車用蓄電池から成る独立電源システムからの給電によって、温室の側窓を気温に応じて自動開閉するシステムを開発した (谷野ら, 2005; Yano et al., 2007)。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を設置した東西棟ビニルハウスの発電電力と遮光の関係を研究した。その結果、太陽電池モジュールの間隔を空けて市松模様に配置すると、一直線状に配置した場合と同等の発電量を得ることができ、尚且つ温室内の光分布の偏りを改善できることが明らかとなった。その発電量は、試験地の現実の日射条件において、 $8 \text{ kWh m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  と見積もられた。これは、地中海沿岸の一般的な温室の全電力需要を賄うことができる量であった。同じ頃、イタリアでは、温室屋根面積の 50-100% に太陽電池を設置して、売電を新たな収入源とする経営が拡大し、議論を呼んでいた (Tudisca et al., 2013; Castellano, 2014; Cossu et al., 2014)。他方、申請者は、太陽電池セル一つ一つの大きさが太陽の視直径よりも十分小さければ、直達光が遮られることがなくなり、作物への影の影響は緩和されると考えていた。これを検証するため、直径が僅か 1.8 mm の球状太陽電池セルを温室屋根面に分散配置して、遮光率 25% かつ、全日快晴ならば  $40 \text{ kWh m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  の電気エネルギーを得るようなガラス温室用半透過型太陽電池モジュールのプロトタイプを開発した (Yano et al., 2014)。試算の結果、その電気エネルギーによって、多日照地域の一般的な温室環境制御用電力

負荷の運転を完全に賄うことが可能と見積もられた。しかし、学会や一般向けの講演等で成果発表するたびに、曇りの日には太陽電池を除ける仕組みを作れないかと指摘された。本申請は、そのような社会の声を受けて設定した新規課題であった

### 2. 研究の目的

温室栽培の環境制御で消費される地下資源由来のエネルギー消費量の割合を減じつつ、作物の収量と品質を向上させることを大きな目標とする。そのために、温室が存在する場所で得られる太陽光エネルギーを太陽電池で電力に変換し、その電力を温室栽培の環境制御に用いることとする。研究期間内では、日射強度に応じて受光角度を自律的に変化させる、エネルギー自給型の半透過太陽電池ブラインドを考案し、そのハードウェアを設計・試作する。そして、半透過太陽電池ブラインドによる温室の遮光および発電の効果を実験で評価することとする。

温室で一般に使用される遮光ネットや塗料では、反射した日射エネルギーを捨てるだけであった。本研究では、温室の遮光を半透過型太陽電池ブラインドで代替するので、日射利用効率が向上することが期待できる。ブラインド開度の自動制御に要するエネルギーは、自ら発電した電気エネルギーで 100% 賄うこととする。余剰電力量をバッテリーに蓄え、補光、換気、あるいはかん水装置などの温室環境制御機器の運転に利用可能か検討する。システムの動作試験を実施して、日射、発電量、消費電力量、遮光の関係を解析し、実規模温室へ半透過型太陽電池ブラインドシステムを拡張する場合の設計基準を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) ブラインド制御回路の試作と 1 枚の太陽電池ブラインドの制御試験

直径 1.2 mm の単結晶 Si セル (スフェラー®、スフェラーパワー株式会社) 13,764 粒を埋設した定格出力 1.2 W、大きさ 500 mm × 200 mm × 11 mm の半透過太陽電池モジュールをブラインド材として供試した。モジュールの質量は 2.2 kg であった。Si 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。セル一つ一つの大きさは、植物から見上げる太陽の視直径よりも十分小さいので、温室屋根面に設置する太陽電池が直達光を完全に遮ることはない。モジュールを正面から見た時、半透過部分に占める不透明要素 (Si セルと導線) の割合は 31% であった。残りの 69% は透明であり、日射を透過する。この半透過型太陽電池モジュールを DC モーターの回転軸に接続して、角度を変化させることができる制御回路を製作した (図 1)。制御回路へ日射情報を入力するために、フォトダイオードを用いて日射を電圧信号に変換

した。この電圧信号をオペアンプで増幅して正転信号と逆転信号に分け、モーター駆動 IC に入力した。正転信号と逆転信号の大小関係で、DC モーターに流れる電流の方向を変化させた。2 組のダイオードとスイッチを使用して、太陽電池ブラインドの角度を制御した。回路中の変換抵抗値を調節すれば、ブラインドを回転させる日射の閾値を変更できる仕組みとした。充放電コントローラーを介して制御回路、蓄電池、太陽電池ブラインドを接続し、独立電源システムを構成した。開発したプロトタイプブラインドシステムを島根大学キャンパス内の南北棟温室の西向き屋根面に設置した。なお、この温室は老朽化しており、屋根面のガラスはすべて外れていた。温室屋根の傾斜角に合わせて、ブラインドの設置傾斜角は  $27.5^\circ$  とした。地面から高さ  $3.5\text{ m}$  の温室天頂に日射センサーを水平に据付け、もう一つの日射センサーを傾斜角  $27.5^\circ$  で西向きに設置した。ブラインドと共通の回転軸に互いに逆向きに取り付けた 2 個の日射センサーでブラインド表裏面への入力日射を計測した。入力日射に対する出力の割合から、太陽電池ブラインドの変換効率を求めた。

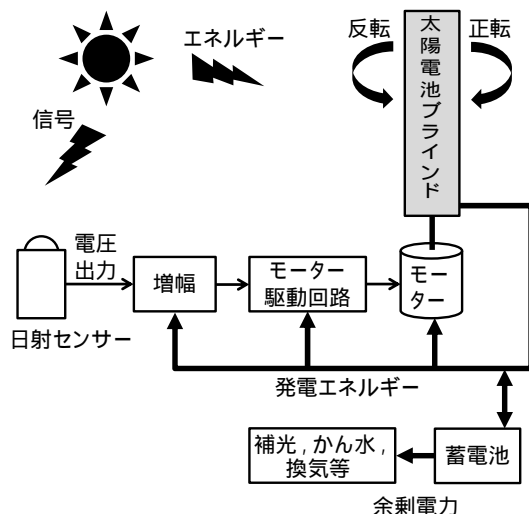


図 1 太陽電池ブラインドの制御ブロック図

(2) 制御回路の夜間切断と太陽電池ブラインドの追加によるシステムエネルギー効率の向上

(1) の実験を終えた後、同じ規格の半透過型太陽電池ブラインドを共通の回転軸上に 1 枚追加した。太陽電池ブラインドを新しいガラス温室の東向き、傾斜角  $26.5^\circ$  の屋根面内側に設置した。屋根の下に設置した理由は、防水構造になっていないブラインドシステムを長期間連続試験するためである。充放電コントローラーの負荷端子に新たに接続した夜間開放制御回路により、夜間にはモーター制御回路を切断した。これにより、ブラインド制御回路における夜間の自己消費電力量を 0 とした。2017 年 2 月 21 日から 4

月 23 日までの間、サンプリング周期  $10\text{ s}$  で日射、回路各部分の電圧とシステムのエネルギー収支を連続的に測定した。

#### 4. 研究成果

(1) ブラインド制御回路の試作と 1 枚の太陽電池ブラインドの制御試験

2016 年 3 月 22 日に、太陽電池ブラインドの遮光および発電特性を 1 分間隔で測定した。ブラインド下の  $1\text{ m}$  離れた場所に屋根面と平行に日射センサーを設置して、太陽電池ブラインドの遮光率を測定した ( $12:40 \sim 15:40$ )。  $14:14$  に  $1.5\text{ W}$  の最大出力電力が得られた。太陽電池ブラインドの制御角度変化に応じて、ブラインド法線と直達光の夾角は  $29^\circ \sim 127^\circ$  の間で変化した。  $0.1\text{ m}^2$  のモジュール面積に対して、日射 - 電力変換効率は  $1.3\%$  であった。モジュールの半透過部分の実効遮光率は  $40\%$  であった。5 月 17 日  $12:00$  から 5 月 23 日  $12:00$  まで連続 6 日間に渡り、1 秒間隔の測定でブラインドの動作検証とエネルギー収支解析を実施した。ブラインドは日射が  $500\text{ W m}^{-2}$  前後の時に 27 回開閉動作した。太陽電池ブラインドの積算発電エネルギー  $E_{PV}$ 、システムの積算正味充電エネルギー  $E_C$  および積算放電エネルギー  $E_D$  は 6 日間でそれぞれ  $174\text{ kJ}$ 、 $-39\text{ kJ}$ 、 $173\text{ kJ}$  であった。  $E_C$  が負の値であったことから、放電が充電を上回っていたことがわかる。実験終了時点で、  $E_{PV} - E_D - E_C = 40\text{ kJ}$  のエネルギーが充放電コントローラー、導線および蓄電池の内部抵抗によって消費された。本プロトタイプシステムのモーター一台で、同軸に取り付けた 2 枚以上の太陽電池ブラインドを回転させれば、  $E_D$  が大幅に増えるため、  $E_C$  が正になると推察した。

(2) 制御回路の夜間切断と太陽電池ブラインドの追加によるシステムエネルギー効率の向上

ブラインドは日射が  $658 \pm 159\text{ W m}^{-2}$  (平均値  $\pm$  標準偏差) の時に  $391$  回屋根面と平行になるように回転し、  $250 \pm 47\text{ W m}^{-2}$  の時に  $391$  回屋根面と直角になるように回転した。  $E_{PV}$ 、  $E_C$  および  $E_D$  は、実験終了時にそれぞれ  $1258\text{ kJ}$ 、  $208\text{ kJ}$ 、  $999\text{ kJ}$  であった。  $E_{PV} - E_D - E_C = 51\text{ kJ}$  のエネルギーがシステムで自己消費された。(1) の実験では、6 日間で  $40\text{ kJ}$  の自己消費があったが、(2) では夜間電力消費を 0 とすることにより、自己消費は二ヶ月で  $51\text{ kJ}$  と大幅に削減された。実験終了時点までに積算で  $208\text{ kJ}$  充電しており、ブラインドの追加およびモーター制御回路の改良によって、日照の少ない 2 月から 4 月の山陰地方においても、システムのエネルギー自給が実現できることを実証した。山陰の気象統計データから年間のエネルギー収支を算定した。その結果、年間で  $2\text{ kWh m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$  の余剰電力量が生じるため、他負荷に電力を供給することが可能と推定した。日照条件の良い地

中海沿岸の簡易な温室環境制御設備で消費する電力量がおよそ  $2 \text{ kWh m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  との報告がある (Capiotti et al., 2008) ため、本システムを屋根面全体に拡張すれば、独立電源システムを構築できる可能性がある。半透過型の太陽電池を用いることで、強日射時には温室内の日射を緩和しつつ発電する一方、曇天時にはブラインドを屋根面と直角に立てることで、温室内部への日射の取り込みを増やせることを確認した。

以上の成果を 4 件の学会大会で発表した。そのうち、国際会議 GreenSys 2017 での発表は The excellent poster award third prize を受賞した。データを取り纏め、Journal of Agricultural Meteorology で発表予定である (受理、印刷中)。

#### <引用文献>

- Capiotti et al. 2008 *Acta Horticulturae* 797:373-378.
- Castellano 2014 *Journal of Agricultural Engineering XLV*, 433:168-175.
- Cossu et al. 2014 *Applied Energy* 133:89-100.
- Ozkan et al. 2004 *Biomass and Bioenergy* 26:89-95.
- Rocamora and Tripanagnostopoulos 2006 *Acta Horticulturae* 719:239-245.
- Sonneveld et al. 2010a *Biosystems Engineering* 105:51-58.
- Sonneveld et al. 2010b *Biosystems Engineering* 106:48-57.
- Sonneveld et al. 2011 *Solar Energy* 85:432-442.
- Tudisca et al. 2013 *African Journal of Agricultural Research* 8:3089-3096.
- 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.
- Yano et al. 2014 *Biosystems Engineering* 122:62-73.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

#### [雑誌論文](計1件)

Zhi Li, Akira Yano, Marco Cossu, Hidekazu Yoshioka, Ichiro Kita, Yasuomi Ibaraki. 2018. Shading and electric performance of a prototype greenhouse blind system based on semi-transparent photovoltaic technology. *Journal of Agricultural Meteorology* (in press). (査読有).  
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/agr>

met/-char/ja/

#### [学会発表](計4件)

李治, 谷野章, 喜多威知郎, 吉岡秀和, 荻木康臣. 2017. 温室遮光制御用半透過型太陽電池ブラインドシステムの改良および性能評価. 日本生物環境工学会 2017 年松山大会.

Zhi Li, Akira Yano, Marco Cossu, Yasunori Katsumata, Tetsuo Matsuoka, Hidetoshi Nakamura, Toshinori Matsumoto, Josuke Nakata. 2017. Prototype greenhouse blind-type shading system using a semi-transparent photovoltaic module. GreenSys 2017.

李治, 谷野章, 中村英稔, 松本利則. 2016. 半透過型太陽電池モジュールを利用したブラインド式温室自動遮光システムの開発. 日本生物環境工学会 2016 年金沢大会.

谷野章, 李治, 勝股泰徳, 松岡徹朗, Marco Cossu, 中村英稔, 松本利則. 2016. 温室用半透過型太陽電池モジュールの開発およびブラインド式遮光資材への応用. 日本農業気象学会 2016 年全国大会.

#### 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