

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K05903

研究課題名(和文)多日照地域の温室の省エネルギー化と作物生育の向上に資する太陽電池ブラインドの開発

研究課題名(英文)Development of a photovoltaic blind system for energy saving and crop growth improvement in high-insolation region greenhouses

研究代表者

谷野 章 (Yano, Akira)

島根大学・学術研究院環境システム科学系・教授

研究者番号：70292670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：多日照地域の温室栽培における電力需要を太陽光発電で賄いつつ、作物の収量と品質を向上させる、ブラインド型の動的遮光機能を有する半透過型太陽光発電システムを開発した。あらかじめ設定した日射閾値を超えると、ブラインドは温室屋根面と平行角度まで回転して、40%程度遮光しつつ発電した。日射強度が閾値を下回ると、屋根面と垂直の角度にブラインドは向きを変えて温室内部への日射の取り込みを優先した。制御システムの自己電力消費を賄うための十分な量の電気エネルギーをブラインドが発電しつつ、日射強度に応じて遮光率を自律的に変化させることができた。ブラインド背後の遮光条件でキュウリ実生を育て、日射制御の効果を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発途上国の人口増加と地球規模の温暖化は、食料生産を担う農業分野に、土地面積当たりの生産量の増加とCO2排出削減を同時に迫っている。温室栽培は野菜や果物の生産において重要な役割を担っているが、地下資源由来の燃料や電力の消費に依存しているため、農業分野における主要なCO2排出源となっている。また、燃料や電力価格の上昇は生産者の収益減に直結する。したがって、温室栽培におけるエネルギー消費量を大幅に削減しつつ、作物生産効率を向上させる技術の開発が求められる。本研究で開発した太陽電池ブラインドシステムは、多日照地域の温室において作物と電力の両方を同時に生産する方法を具体的に示した。

研究成果の概要(英文)：Our semi-transparent photovoltaic (PV) system, developed with a blind-type dynamic shading control, is expected to improve greenhouse (GH) crop quality and yield. The system, which provides PV-generated electrical energy, is expected to provide some of the electrical energy necessary for GH cultivation in high-insolation regions. When solar irradiance exceeded a pre-set threshold value, the blinds rotated to a position parallel to the GH roof surface to generate electrical power with a 40% shading rate. When the solar irradiance decreased below the threshold value, the blinds turned to an angle perpendicular to the roof surface to increase the sunlight transmittance. The blinds autonomously changed the shading rate in response to solar irradiance, simultaneously producing a sufficient amount of electrical energy for the blind control system. Cucumber seedlings were grown under the shading conditions behind the blinds to investigate the shading control effects.

研究分野：植物環境工学

キーワード：再生可能エネルギー 温室 太陽光発電

### 1. 研究開始当初の背景

温室栽培のエネルギー需要を、その場で得られる再生可能エネルギーで賄うための研究が各国で活発に行われるようになった（例えば、Sonneveld et al., 2010; Fatnassi et al., 2015）。太陽光発電エネルギーの温室栽培への活用に関しては、Yano et al. (2010) が屋根面積比で13%を占める大規模な太陽電池を東西棟温室の南屋根面に設置し、影による作物への影響と発電エネルギーの関係について研究した。その結果、多日照地域であれば、その発電エネルギーによって、温室の空調などの環境制御設備の運転を完全に賄うことが可能と見積もられた。さらに、その太陽電池をチェック状に隙間を空けて配置すると、温室への採光が適切に確保されるため、作物の生育が抑制されないことが明らかとなった（Kadowaki et al., 2012）。しかも、そのチェック模様を構成する太陽電池1つ1つの大きさを太陽の視直径よりも小さくすれば、太陽電池が直達光を完全に遮ることがなくなり、作物への影の影響は一層緩和されることに気づいた。このアイデアに基づき、Yano et al. (2014) は、直径が僅か1.8 mmの太陽電池セルを疎らに配置することで、遮光率25%を実現するガラス温室屋根材用の半透過型太陽電池を開発した。半透過型太陽電池で夏期の強すぎる日射を適度に遮りつつ電力に変換し、その電力を栽培管理に利用すれば、温室全体での日射利用効率を向上できる。しかし、曇天時の弱い日射も同様に一定程度遮ってしまうという問題があった。そこで、日射強度に応じて向きを変えるブラインドの仕組みを半透過型太陽電池に付加することを着想した。申請者らの研究グループは、このように着想した半透過型太陽電池ブラインドシステムの開発に着手し、桌上規模のプロトタイプを開発中であった（Li et al., 2018）。

### 2. 研究の目的

多日照地域の温室栽培における電気エネルギー需要を太陽光発電で賄いつつ、作物の収量と品質を向上させる、革新的なブラインド型の動的遮光機能を有する半透過型太陽光発電システムを開発する。これにより、温室栽培のエネルギー効率の改善に貢献する。

### 3. 研究の方法

独立電源型のブラインドシステム制御回路を試作した（図1）。その仕組みと機能の概要を説明する。屋外の日射強度に比例して変化する日射センサーの電圧出力をアンプで増幅してモーター駆動回路に入力した。屋外の日射強度が閾値（例えば、 $0.8 \text{ kW m}^{-2}$ ）を超えると、モーターがブラインドを温室屋根面と平行角度まで回転させて、40%程度遮光しつつ発電する。日射強度が低下し、閾値を下回ると、モーターが反転して、屋根面と垂直の角度でブラインドを停止させて温室内部への日射の取り込みを優先させる。この動作が日射強度に応じて自律的に繰り返される。生産者がブラインド回転の日射閾値を制御回路の可変抵抗の値（図1の $R_0$ 、すなわちボリューム）で調節可能とした。半透過型太陽電池で発電した電気エネルギーは充放電制御回路を介してバッテリーに充電される。明暗検知回路によって、夜間はブラインド制御回路がバッテリーから切り離される。これにより、制御回路における夜間の自己消費電力を0とした。日出とともに明暗検知回路がバッテリーとブラインド制御回路を接続し、日射に応じた半透過型太陽電池の回転動作がバッテリーからの給電で可能となる。

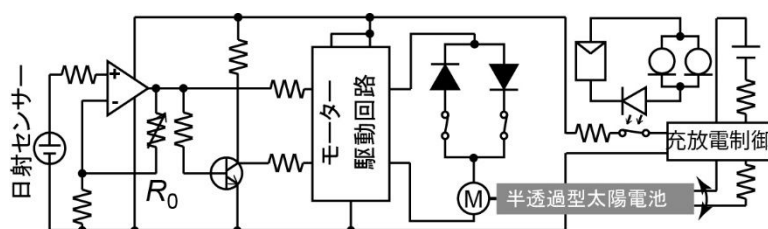


図1 独立電源型の半透過型太陽電池ブラインドシステムの制御回路  
M: 直流モーター;  $R_0$ : ブラインド動作日射閾値調節用可変抵抗

使用した半透過型太陽電池ブラインド材1枚（50 cm × 20 cm）中には、直径1.2 mmの単結晶太陽電池セルが13,764粒包埋されており、ブラインド材1枚の定格出力は1.5 Wである。各太陽電池セルは導線で連結され、それらの部分は不透明であるが、それらの隙間が透明であり、日射を透過させる。ブラインド面を正面から見るときの隙間の比率は70%程度である。この太陽電池ブラインド材は、申請者らが開発したものであり、本申請ではその製造を担った民間企業の支援を受けて本研究のために複数枚特注製作した。3枚のブラインド材からなる太陽電池ブラインドシステムをガラス温室に装着して、通年にわたり連続運転させ、エネルギー収支および温室内外日射のデータを収集した。

研究期間の後半では、キュウリ実生を供試して、遮光制御の効果を検証した。キュウリ実生を選択した理由は、子葉の展開角度や胚軸伸長などの光応答が、ブラインドの遮光調節機能の

有無によって強く影響を受けることが想定できたこと、一週間程度のサイクルで繰り返し実験が可能であること、ならびに同一条件で多数の個体をサンプルとして統計評価を可能とすること、である。例えば、 $0.8 \text{ kW m}^{-2}$  を遮光動作の日射閾値として設定した場合、日出後しばらくは遮光しないため、通常の温室と同じように日射が温室内に入る。 $0.8 \text{ kW m}^{-2}$  に達するとブラインドが屋根面と平行になり、40%の遮光を維持する。この間に遮った日射は発電に利用される。温室作物の光飽和点は光合成有効光量子束密度 (PPFD) で  $1000\text{-}1500 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  程度である (Larcher, 1995)。これに対して、真夏の快晴日の PPFD は  $2000 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を超える。 $0.8 \text{ kW m}^{-2}$  は  $1440 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  の PPFD に相当する。このため、強日射でダメージを受ける、あるいは強光を避ける生理応答をするような作物では、動的な遮光制御により収量や品質の向上が期待できる。実規模温室内で作物の応答を研究するためには、ブラインドを構成する太陽電池の数がまだ少ない。その理由は、この特注製造の半透過型太陽電池が高価であり、容易には大面積の屋根面をカバーする程の枚数に増やすことができないためである。そこで、実験室内の人工気象器内で人工光源を用いて、1枚のブラインド材半透過型太陽電池の遮光が実生に及ぼす影響を研究した。具体的には、人工気象器内に超高輝度白色 LED を配備して、真夏の正午頃の屋外における PPFD に相当する強い光を放射させた。この強光環境で育てたキュウリ実生の応答と、太陽電池ブラインドを光源と植物の間に設置して強光を緩和した光環境下で育てた実生の応答を光形態形成と生長速度の観点から比較した。さらに、LED 光源をハロゲンランプに代えて、同様の実験を繰り返した。

#### 4. 研究成果

3枚の半透過型太陽電池からなるプロトタイプブラインドシステムをガラス温室に装着して遮光制御動作を試験した。屋外の日射強度が閾値 ( $0.5 \text{ kW m}^{-2}$ ) を超えると、モーターが半透過型太陽電池ブラインドを温室屋根面と平行角度まで回転させて、40%程度遮光しつつ発電した (図 2a)。屋外の日射強度が低下し、閾値を下回ると、モーターが反転して、屋根面と垂直の角度でブラインドを停止させて温室内への日射の取り込み量を増やした (図 2b)。この動作を日射強度に応じて自律的に繰り返させることができた。ブラインド回転の日射閾値を  $500$ 、 $700$ 、 $900 \text{ W m}^{-2}$  とすれば、温室内に届く日射エネルギーは、それぞれ屋外の  $59$ 、 $65$ 、 $73\%$  となることを数値計算によって見積もった。

温室におけるプロトタイプの実証実験の経過を学術誌 (Li et al., 2018) で発表した。その後もブラインドの自律運転を継続させ、データを積み重ねた。さらに、本研究の背景、学術的意義、展望を取り纏めて総説として発表した (Yano and Cossu, 2019)。



図 2 本研究で開発した半透過型太陽電池ブラインドシステム

(a)日射が強いとき太陽電池は温室屋根面と平行になる発電優先モードとなる。(b)日射が弱いとき太陽電池は温室屋根面と垂直になる採光優先モードとなる。(Li et al., Energies. 2018; 11(7):1681 <https://doi.org/10.3390/en11071681> (An open access article distributed under the terms and conditions of the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>))).

試作した半透過型太陽電池ブラインドシステムを年間連続運転させ、エネルギー収支が正で推移することと機構の信頼性を確認した。エネルギー収支および温室内外日射データの解析結果に基づき、ブラインド回転の日射閾値を  $100 \text{ W m}^{-2}$  間隔で 11 段階に設定した場合のそれぞれのエネルギー収支と温室内の日射を計算した。例えば、通年全日快晴を仮定した場合、島根大学の実験温室において、ブラインドを  $900 \text{ W m}^{-2}$  の日射閾値で回転させると、温室に届く日射を発電と栽培に等量ずつ分配できることを明らかにした。通年でのブラインドシステムの動作検

証で得られたデータを取りまとめ、論文として学術誌でオープンアクセスで公表した(Li et al., 2020)。その成果の要点は、エネルギー自給および制御自律的に動作する半透過型太陽電池ブラインドによって、温室に届く太陽光を栽培と発電に適切に配分するプロトタイプシステムが実現したことにある。このことが、研究計画段階における重要な達成目標であった。

ブラインドシステムの開発と並行して、ブラインドによって動的に制御された遮光環境下でキュウリの実生を栽培して、遮光の効果を検証した。予想に反して、強光下におけるキュウリ実生の発育は量、質共に遮光制御環境下で育てた実生よりも優れていた。この理由を考察する中で、実験に用いた高輝度白色 LED 光源の放射が赤外域を全く含まないという事実に気づいた。すなわち、光合成有効波長域の放射は確かに真夏の正午レベルであったが、赤外域を含まなかったために、自然界で受けるような熱によるダメージを実生が受けていなかったのである。したがって、赤外域を含む光源を用いて再実験することが次の課題となった。LED 光源に代えて、赤外域を含むハロゲンランプ光源を用いて再実験を実施した。真夏の正午頃の屋外における PPFD に近づけつつ、赤外線も照射した。この強い放射環境で育てた実生の発育と、太陽電池ブラインドを光源と植物の間に設置して強放射を緩和した環境下で育てた実生の発育を光形態形成と生長速度の観点から比較した。その結果、キュウリ実生は、太陽電池ブラインドの有無によらず徒長した。この理由は、おそらく放射照度の赤外成分の形態形成への影響が顕在化したためである。半透過型太陽電池による遮光の有無による光形態形成反応への影響は現在のところ確認できていない。可視成分と赤外成分が太陽光に近い光源を用いて、この実験を継続する課題が残った。

研究期間内では、多日照地域において、強すぎる日射による葉焼けなどの作物へのダメージを回避するために施される温室の遮光を、半透過型太陽電池製のブラインドシステムで実現するための研究を実施した。そのブラインドシステムは、システムの自己消費を賄うための十分な量の電気エネルギーを生産しつつ、日射強度に応じて遮光率を自律的に変化させることができた。天候や季節に応じた自律的な光強度管理によって、作物の生育と品質を向上させることを目指し、実証実験を継続中である。

#### <引用文献>

- Fatnassi H, Poncet C, Bazzano MM, Brun R, Bertin N. A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. *Sol Energy* 2015;120:575-584.
- Kadowaki M, Yano A, Ishizu F, Tanaka T, Noda S. Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth. *Biosyst Eng* 2012;111:290-297.
- Larcher W. *Physiological plant ecology*. third ed. Berlin: Springer; 1995.
- Li Z, Yano A, Cossu M, Yoshioka H, Kita I, Ibaraki Y. Shading and electric performance of a prototype greenhouse blind system based on semi-transparent photovoltaic technology. *J Agric Meteor* 2018;74:114-122.
- Sonneveld PJ, Swinkels GLAM, Bot GPA, Flamand G. Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse. *Biosyst Eng* 2010;105:51-58.
- Yano A, Kadowaki M, Furue A, Tamaki N, Tanaka T, Hiraki E, Kato Y, Ishizu F, Noda S. Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse. *Biosyst Eng* 2010;106:367-377
- Yano A, Onoe M, Nakata J. Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. *Biosyst Eng* 2014;122:62-73.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Zhi Li, Akira Yano, Hidekazu Yoshioka	4. 巻 279
2. 論文標題 Feasibility study of a blind-type photovoltaic roof-shade system designed for simultaneous production of crops and electricity in a greenhouse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Energy	6. 最初と最後の頁 115853
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apenergy.2020.115853	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Akira Yano, Marco Cossu	4. 巻 109
2. 論文標題 Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Renewable and Sustainable Energy Reviews	6. 最初と最後の頁 116-137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.rser.2019.04.026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhi Li, Akira Yano, Marco Cossu, Hidekazu Yoshioka, Ichiro Kita, Yasuomi Ibaraki	4. 巻 11
2. 論文標題 Electrical energy producing greenhouse shading system with a semi-transparent photovoltaic blind based on micro-spherical solar cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1681
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en11071681	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷野章
2. 発表標題 太陽電池を屋根面に装着した温室の研究事例紹介
3. 学会等名 園芸学会令和元年度秋季大会 小集会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李治, 谷野章, 喜多威知郎, 吉岡秀和, 荊木康臣
2. 発表標題 温室遮光制御用半透過太陽電池ブラインドシステムのエネルギー収支
3. 学会等名 日本生物環境工学会2019年千葉大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究に参加した学生の博士論文 LI ZHI (2020) Development of a greenhouse dynamic shading system using a semi-transparent photovoltaic blind. 鳥取大学大学院連合農学研究科博士学位論文</p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
イタリア	University of Sassari		