

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 5日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21780230

研究課題名（和文） 園芸施設屋根面を利用した栽培調和型太陽光発電システム

研究課題名（英文） An electricity and crop producible greenhouse equipped with a roof mounted photovoltaic array

研究代表者

谷野 章 (YANO AKIRA)

島根大学・生物資源科学部・准教授

研究者番号：70292670

研究成果の概要（和文）：屋根面積比で13%を占める太陽電池アレイを東西単棟温室南屋根面に直線状または市松模様を設置した。その太陽電池アレイの発電エネルギーおよびその温室内で水耕栽培したネギの生育に及ぼす太陽電池の影の影響を解析した。太陽電池アレイの配置の工夫が作物の成長抑制を軽減するために重要であることが明らかとなった。太陽電池設置温室の年間作物収量損失、インバーターを通じて売電される電力量および太陽電池とインバーターのペイバックタイムも見積もった。

研究成果の概要（英文）：A PV array with 13% of the greenhouse-roof area coverage was attached to the southern roof of an east-west oriented single-span greenhouse in the form of straight-line or checkerboard. Electrical energy generated by the PV array and effects of PV array shading on the Welsh onion growth were analyzed. The results indicated that the negative shading effects on plant growth can be mitigated by the checkerboard PV module arrangement. Crop revenue losses, electricity revenues and the cost payback time for the PV array and the inverter were estimated.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：再生可能エネルギー・太陽光発電・太陽電池・園芸学・農業工学

## 1. 研究開始当初の背景

温室の屋根に照射される太陽光の一部を太陽電池で電力に変換し、その温室の換気窓開閉制御システム(杉浦ら, 2002; 谷野ら, 2005a; Yano et al., 2007)や遮光カーテン開閉システム(谷野ら, 2007)で消費される電気エネルギーの全てを賄うことが可能であ

ることが実証された。Yano et al. (2007) の換気制御システムで用いられた太陽電池面積 (0.078 m<sup>2</sup>) と温室の屋根面積の比はわずか0.2%にすぎなかった。この太陽電池面積と屋根面積の比は温室骨材面積と屋根面積の比(5%)よりもはるかに小さかった。すなわち、太陽電池の面積をもう少し拡大して追加の

環境制御装置を運転することは現実的な方法であることが示唆された。特に、夏期には遮光カーテンで温室内の日射をあえて減じるほどであるから、太陽電池による数%の遮光は許容され得ると考えた。しかし、より多くの（あるいは長期間）環境制御装置を運転するために、温室屋根面に配置する太陽電池の面積をそれ以上に拡大すれば、必然的に作物へ到達する日射が減り、生育が抑制されるようになると予想できる。したがって、作物生育への影響を最小限に留めつつ、その中で最大の発電エネルギーを得るような太陽電池の設置位置および配向の工夫が望まれる。しかし、温室屋根に装着した太陽電池の配置と発電量および温室内地射の関係については僅かな研究で特定の例について指摘されている程度であり（古在ら，1999；谷野ら，2005b；Rocamora and Tripanagnostopoulos，2006），得られている知識は限定的であった。

-文献-

古在豊樹 他. 1999. 太陽電池パネルを設置した片屋根温室内の日射透過シミュレーション. 生物環境調節 37(2):101-108.

Rocamora MC, Tripanagnostopoulos Y. 2006. Aspects of PV/T solar system application for ventilation needs in greenhouses. Acta Hort. 719:239-245.

杉浦浩文 他. 2002. 太陽光発電エネルギーで動作するビニルハウス側窓開閉装置のモデル実験. 農業機械学会誌 64(6):128-136.

谷野 章 他. 2005a. 太陽光発電エネルギーで作動する省電力型ハウス側窓開閉制御装置の開発. 農業機械学会誌 67(2):100-110.

谷野 章 他. 2005b. 園芸施設環境制御装置電源用太陽電池モジュールの開発とハウス内への設置方法の検討. 農業機械学会誌 67(5):124-127.

谷野 章 他. 2007. 太陽光発電エネルギーで作動する遮光カーテン開閉装置の開発. 農業機械学会誌 69(6):57-64.

Yano A et al. 2007. Development of a greenhouse side-ventilation controller driven by photovoltaic energy. Biosystems Engineering 96(4): 633-641.

2. 研究の目的

温室栽培作物の生育を高度に調節するための環境制御では、圧倒的な利便性から電気エネルギー（搬送、照明、冷暖房、および計測・通信・計算・制御のいずれにも利用可能）が駆使される傾向があり、その使用量は今後も増え続ける可能性がある。したがって、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りうる。本研究

では、温室が存在する場所で得られる太陽光を太陽電池を用いて電気エネルギーに変換することによって、温室で利用可能な再生可能エネルギー量を少しでも増やすことを大きな目標としている。温室で太陽光発電を行い、得られた電力で環境制御装置を運転し、結果として作物の収量や品質を向上させる。太陽電池製造時に排出するCO<sub>2</sub>を作物が吸収するCO<sub>2</sub>で相殺し、発電電力および作物の売り上げで太陽電池導入コストを回収する。このような栽培調和型太陽光発電システムの開発を全体構想としている。本申請に係る研究期間では、作物上に生じる影と発電量の適度なバランスが成り立つような温室屋根面への太陽電池の配置方法を定量的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

一 発電量および温室内地射量の計算方法一

温室の任意の位置に任意の配向で設置した太陽電池の発電量およびその太陽電池を設置した温室内地射量を計算するコンピュータプログラムを作成した。太陽電池を基準として設定した座標系を図1に示す。太陽高度を $\theta$ 、太陽電池の傾斜角を $\beta$ 、太陽方位角を $\phi_s$ 、太陽電池法線の方位角を $\phi_p$ 、時角を $\omega$ 、直達光の太陽電池への入射角を $\alpha$ とした。水平面直達日射量  $I_{DH}$  および水平面散乱日射量  $I_D$  の和から水平面全天日射量  $I_{TH}$  を求めた。傾斜面全天日射量  $I_T$  は、傾斜面直達日射量  $I_{TD}$ 、傾斜面散乱日射量  $I_{TS}$ 、地面からの反射成分  $I_{Tr}$  の和から求めた。最後に、 $I_T$  に太陽電池の面積  $S_{pv}$ 、エネルギー変換効率  $\eta$  を乗じ、太陽電池の出力  $P_{pv}$  (W) を算出した。同様に、植物を基準とした座標系を設定して、植物に照射される日射を計算した。図2において、太陽の位置を表すベクトル  $S$  と太陽電池の位置を示すベクトル  $r$  が重なるとき、植物は太陽電池の影となり、植物が受ける直達光が0になるとして植物の受光量を計算した。

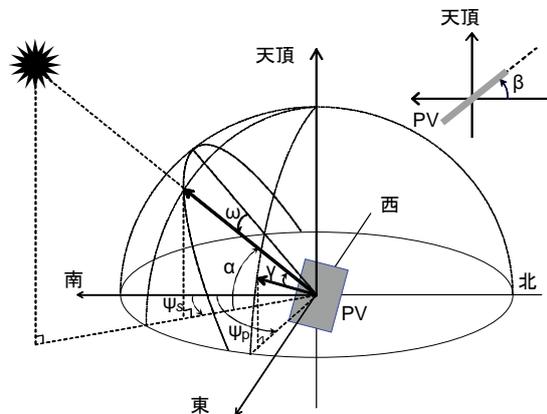


図1 シミュレーションの基本座標系  
PV:太陽電池(photovoltaics)

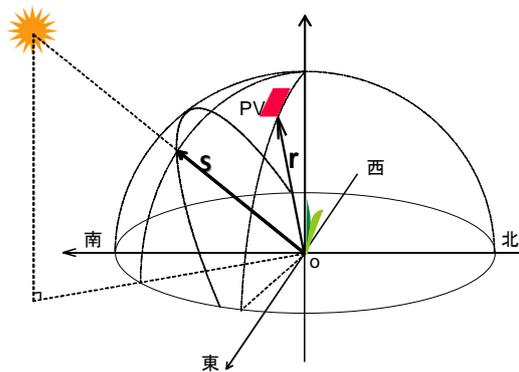


図 2 植物の位置を基準とした太陽と太陽電池の位置関係

—シミュレーションの評価に利用した実験の条件—

太陽電池モジュールを東西単棟プラスチックハウス(5.4 m × 16.0 m × 高さ 3.3 m)のゴシックアーチ型屋根南面内側に設置した。質量 0.42 kg, 短辺 412 mm, 長辺 832 mm, 厚さ 1 mm, 定格最大出力 24 W の太陽電池モジュールを供試した。この太陽電池を選択した理由は、その柔軟性と軽さがプラスチックハウスへの装着に適していたからである。しかしながら、そのメリットのためにモジュールはコスト高となった。このモジュール 30 枚を並列接続して、太陽電池アレイとした。太陽電池アレイの出力は、商用電力系統に接続するためにインバーターに送った。温室内の作物の生育に及ぼす太陽電池アレイの影の影響を 2 つの太陽電池アレイ配置方法で評価した。一つは屋根面に太陽電池アレイを東西方向に直線的に配置する方法 (PV<sub>s</sub>: 図 3a) であり、もう一つは屋根面に太陽電池アレイを市松模様に配置する方法 (PV<sub>c</sub>: 図 3b) である。いずれの配置方法でも、太陽電池アレイは温室屋根面積の 13% を占めた。PV<sub>s</sub> の傾斜角度は年間の発電エネルギーを最大とする 25°, PV<sub>c</sub> の高位置の太陽電池モジュールの傾斜角度は 20°, そして、PV<sub>c</sub> の低位置の太陽電池モジュールの傾斜角度は 26° とした。太陽電池アレイを配備した温室の隣に同型同方位の対照温室を建設した。それらの温室で、ネギ (*Allium fistulosum* L.) を水耕栽培し、太陽電池の影が生育に及ぼす影響を解析した。作成したシミュレーションプログラムによってネギの植栽位置毎に受光量を計算し、生育と受光量の関係性を評価した。太陽電池アレイの配置の違いは作物の生育にも大きな違いを生じさせると考えられ、このことをネギの栽培データと日射計算結果から実証した。最後に、発電エネルギー - 温室内部日射量 - 作物の生育 - コストの関係性を計算し、園芸施設屋根面を利用した栽培調和型太陽光発電システムの総合的な特性を考察した。

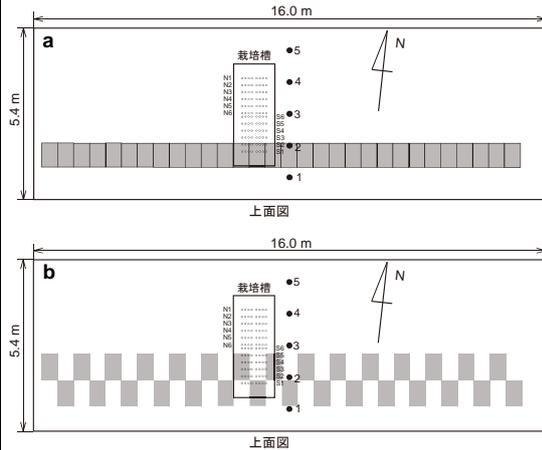


図 3 東西単棟南屋根面に直線的に太陽電池 PV<sub>s</sub> アレイを配置した場合 (a) および市松模様に太陽電池 PV<sub>c</sub> アレイを配置した場合 (b) 黒丸 1-5 は日射センサーの位置 (地上高 1.0 m) を示す。

#### 4. 研究成果

太陽電池アレイの発電量およびその太陽電池アレイを設置した温室内部の日射を計算するコンピュータプログラムを作成し、計算を実行した。年間全日快晴を仮定した場合、PV<sub>s</sub> アレイと PV<sub>c</sub> アレイは、それぞれ 1.134 MWh yr<sup>-1</sup> および 1.127 MWh yr<sup>-1</sup> 発電すると見積もられた。すなわち、PV アレイの配置を大幅に変更しても年間の発電量には大差ないことが明らかとなった。屋外 1 地点、温室内部 7 地点で年間計測した日射を、作成したシミュレーションプログラムによって位置毎に再現し、実測値と計算値の近似性を評価した。その結果、PV<sub>s</sub> アレイと PV<sub>c</sub> アレイでは温室内部の日射受光量の空間分布が著しく異なることが明らかとなった。PV<sub>s</sub> アレイは温室内部の同じ場所に 4 ヶ月にわたって連続的に影を投じた (図 4)。それに対して、PV<sub>c</sub> アレイの影は断続的であり、1 日を通して影になり続ける場所は温室内部に生じなかった (図 5)。このため、長期間では PV<sub>c</sub> アレイを配した温室内部受光量の空間的バランスは PV<sub>s</sub> アレイを配した温室内部受光量のバランスよりも均等化された。しかし、PV<sub>c</sub> アレイは南北方向に幅をとるため、その断続的な影が及ぶ範囲は PV<sub>s</sub> アレイの影が及ぶ範囲より広がった。秋の栽培期間には PV<sub>s</sub> アレイは温室北寄りの特定の位置に影を投下し続けた (図 6a)。その影の下で成長したネギの生体重と乾物重は対照温室の同じ位置のネギと比較して、有意に軽かった (図 6b)。PV<sub>c</sub> アレイも秋には温室北寄りの位置に影を投下した (図 7a)。影が断続的であったため、PV<sub>c</sub> アレイの影によるネギの生育抑制効果は軽減した (図 7b)。この結果から、太陽電池アレイの配置方法の工夫が発電量を損

なわずに作物の生育抑制を軽減するために重要であることが明らかとなった。

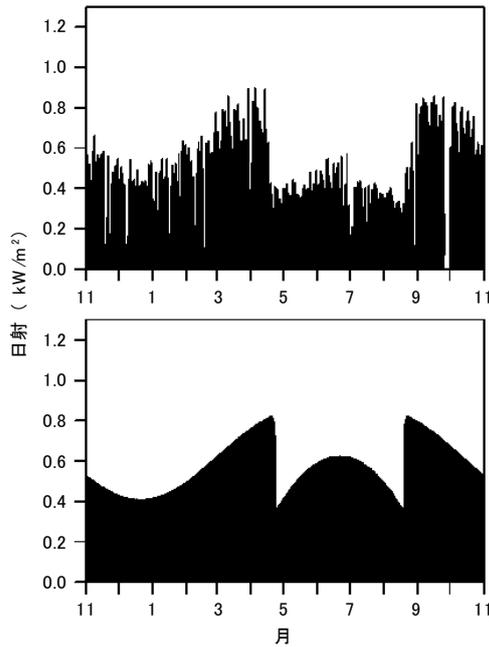


図4 PV<sub>s</sub> 温室内南から 1.7 m, 地上高 1.0 m の日射センサーが計測した年間の全天日射 (上) および同地点の全天日射計算値 (下)

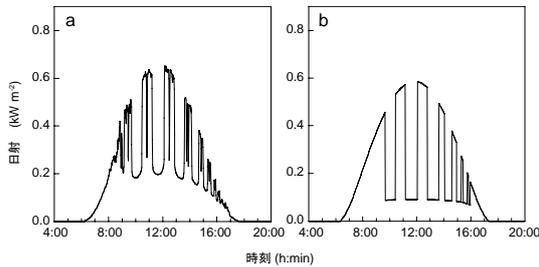


図5 PV<sub>s</sub> 温室南から 2.7 m, 地上高 1.0 m の日射センサーが計測した 10 月 18 日の全天日射 (a) および同地点の全天日射計算値 (b)

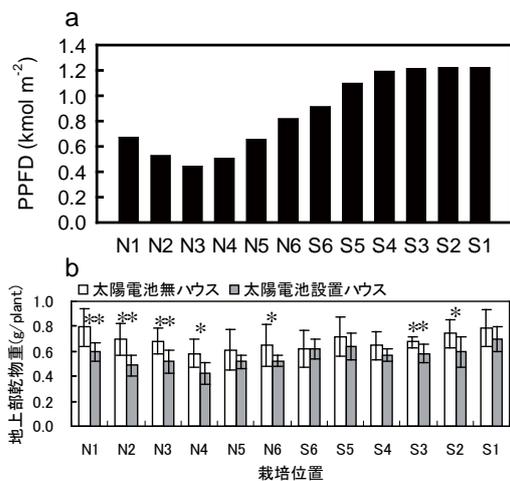


図6 PV<sub>s</sub> 温室の栽培位置毎の栽培期間受光

光子量 (a) および PV<sub>s</sub> 温室で栽培したネギ (灰) および対照温室で栽培したネギ (白) の地上部乾物重 (b). N1 は最も北寄りの栽培位置を, S1 は最も南寄りの栽培位置を示す. \*P < 0.05, \*\*P < 0.01 (t-test).

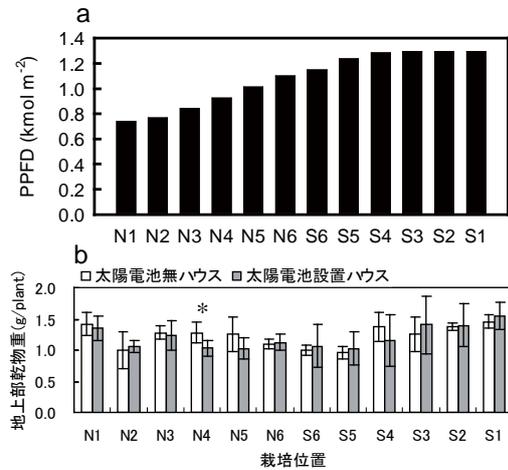


図7 PV<sub>s</sub> 温室の栽培位置毎の栽培期間受光光子量 (a) および PV<sub>s</sub> 温室で栽培したネギ (灰) および対照温室で栽培したネギ (白) の地上部乾物重 (b). N1 は最も北寄りの栽培位置を, S1 は最も南寄りの栽培位置を示す. \*P < 0.05 (t-test).

PV<sub>s</sub> アレイ設置温室の年間作物収入損失を対照温室の年間作物収量との比較として見積もった (図8). 太陽電池の影となる位置で生育したネギの生体重が対照温室のネギの 77%であったことから, この計算では, PV<sub>s</sub> 温室の半分の領域でネギの収量が 25%減と仮定した. 例えば, ネギの値段が 500 円/kg の時, 対照温室に較べて PV<sub>s</sub> 温室の年間作物収入は 25 万円減と見積もられた. また, 年間全日快晴の仮定の下, インバーターを通じて売電される電力量を見積もった (図9). 例えば, 電力料金が 26 円/kWh と仮定すると, 全日快晴条件で年間の売電料金は 3 万円と見積もられた. したがって, 作物の減収分の 12%しか売電で補填しないこととなる. 太陽電池アレイとインバーターのコストを 150 万円と仮定し, これらのペイバックタイムも見積もった (図10). 全日快晴であっても, 本研究に用いた PV アレイとインバーターの初期投資を売電で回収するには 20 年以上必要であった. これらの試算から, 作物の生育を抑制する PV<sub>s</sub> アレイの配置方法で採算がとれる可能性は低いと言える. この原因の一つは, 温室への装着性に優れたフレキシブルアモルファスシリコン太陽電池モジュールを用いたために, 太陽電池のコストが嵩んだことと, 太陽電池を温室被覆材の下に設置したため, 太陽電池モジュールの光-電力変換効率が 5%程度であったことが挙げられる. したがって, 売

電量とペイバックタイムを改善するためには、アモルファスシリコンより発電効率の高い多結晶太陽電池モジュールの使用が効果的であろうと考えられた。もし、 $PV_c$ アレイが2倍の効率を有する半分の面積の多結晶太陽電池モジュールで置き換えられれば、影面積は相当縮小して植物の成長は一層改善し、ペイバックタイムも短縮される。そのためには、発電効率が高く、軽量で温室への装着が容易な多結晶太陽電池モジュールの開発が望まれる。もちろん、もし温室の近傍に十分な未利用地があれば、太陽電池をそこに設置することで作物への影の影響は除去される。全日快晴の仮定ではなく、本研究者の地域の実測日射量で計算すると、 $PV_s$ アレイおよび $PV_c$ アレイいずれでも  $690 \text{ kWh yr}^{-1}$  の電力量が見込まれる。この電気エネルギーを用いれば、例えば、75 W の窓換気モーターや補光用照明器を年間にわたって連続運転可能であり、1.8 kW のポンプやファンであれば毎日1時間の稼働が可能である。これらの環境制御装置の運転は作物生産向上に貢献するであろう。これらの理由により、低価格で発電効率の高い太陽電池モジュールを、適切な規模と配置方法で利用すれば、温室作物生産に有益となるであろう。太陽電池アレイの発電量と許容される影のバランスは、植物種、地理的位置、気候、季節、そして温室の素材と構造で異なる。温室の方位も強く影響する。南北棟については、南北に長い太陽電池アレイを屋根面に直線的に設置すると、東西棟の南屋根面東西方向に  $PV_s$ アレイを設置する場合よりも作物への影の影響は低減するが、発電量も減少するであろう。作物生産とそのために利用可能な再生可能電気エネルギー生産の両立に向けたさらなる研究が必要である。

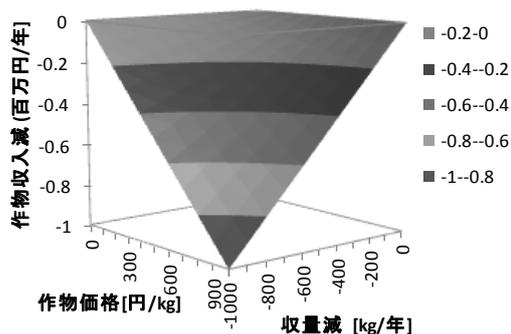


図 8 対照温室に対する  $PV_s$  温室の作物収入の見積値

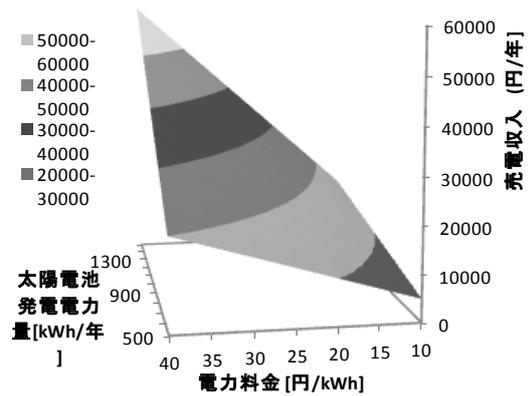


図 9  $PV_s$  温室の売電収入の見積値 (全日快晴を仮定)

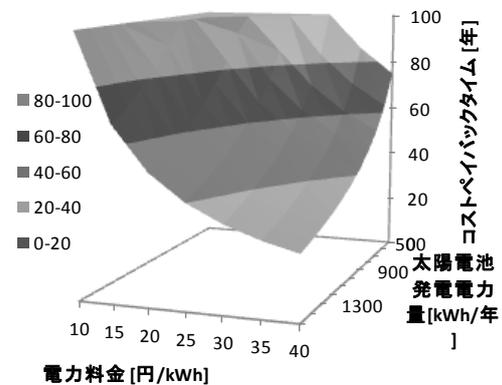


図 10 太陽電池アレイとインバーターのためのコストペイバックタイム見積値 (全日快晴を仮定)

## 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 2 件)

①Kadowaki M, Yano A, Ishizu F, Tanaka T, Noda S (2012) Effects of greenhouse photovoltaic array shading on Welsh onion growth. Biosystems Engineering 査読有 111:290-297.

DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2011.12.006

②Yano A, Kadowaki M, Furue A, Tamaki N, Tanaka T, Hiraki E, Kato Y, Ishizu F, Noda S (2010) Shading and electrical features of a photovoltaic array mounted inside the roof of an east-west oriented greenhouse. Biosystems Engineering 査読有 106:367-377.

DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2010.04.007

[学会発表] (計 3 件)

①Kadowaki M, Yano A, Ishizu F, Tanaka T, Noda S. Photovoltaic array shading effects

on Welsh onion growth. GreenSys 2011. 2011  
年6月6日 Halkidiki (Greece)

②Yano 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. 28th  
International Horticultural Congress.  
2010年8月25日. Lisbon (Portugal)

③谷野章, 古江彩, 玉木伸人, 門脇正行, 守  
谷珠美, 田中俊彦, 加藤善也, 石津文人, 野  
田修司. 東西棟ハウス屋根面に配置した太陽  
電池アレイの発電エネルギーおよびそのハ  
ウス内の光環境. 日本生物環境工学会 2009  
年福岡大会. 2009年9月7日. 九州大学 (博  
多)

## 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・准教授

研究者番号：70292670