
技 術 論 文

農地発電用途に最適化された円筒形太陽電池の開発

Development of Cylinder-Shaped Photovoltaics Designed for Agriphotovoltaics Applications



技術開発センター
第三開発室 リーダー
野村 大志郎
Daishiro Nomura

技術開発センター
第三開発室
博士(工学) 廣谷 太佑
Daisuke Hirotsani

技術開発センター
開発管理室
園 勇哉
Yuya Sono

技術開発センター
第三開発室
武谷 利広
Toshihiro Takenoya

要 旨

我が国において、平板太陽電池の適切な設置場所の減少は、森林伐採による環境破壊や乱開発による景観破壊などを引き起こす原因となっている。耕作地やビニールハウス・ガラス室、耕地けい畔、耕作放棄地への太陽電池導入ポテンシャルは 436GW と試算され、太陽電池の新しい設置場所として期待されている。一方、農作物の上に平板太陽電池を設置した場合、下部に日陰が発生するため、農作物に十分な光が当たらず、農作物の収量低下につながる懸念がある。本実証では、円筒形状の太陽電池と平板形状の太陽電池を農作物の上部にそれぞれ設置し、太陽電池下で育てられた農作物の収穫量および、太陽電池で得られた発電量を比較評価することで、円筒形太陽電池の農地発電用途に関するポテンシャルを評価した。

Abstract:

In Japan, the decrease in suitable flat PVs installations is causing environment destruction due to deforestation and landscape destruction due to overdevelopment. The potential for the introduction of PVs on cultivated land, vinyl houses/glasshouses, arable fields and abandoned land is estimated to be 436 GW, which is expected to become a new location for PVs installations. In contrast, when flat PVs are installed on top of crops, there is concern that the lack of light below the PVs could lead to lower crop yields. In this study, cylindrical PVs and flat PVs were installed on top of crops, and the potential of cylindrical PVs for agriphotovoltaics applications was assessed by comparing the yield of crops grown under the PVs and the quantity of electricity generated by the PVs.

1. はじめに

2012 年導入の再生可能エネルギーの固定買取制度 (FIT 法)により、我が国の太陽光発電所は 2020 年の 9GW/年をピーク¹⁾に急増した結果、国土平地面積当りの太陽光設備容量は世界一となった²⁾。国内では太陽電池の適切な設置場所が減少しており、森林伐採や廃棄による環境汚染、住民の意向を無視した乱開発によ

る争いの増加、景観破壊、また発電パネルによる太陽光の反射による QOL(Quality of Life)低下等が問題視されている^{3,4)}。

「太陽光発電における新市場拡大等に関する検討」では耕作地、ビニールハウス・ガラス室、耕地けい畔と耕作放棄地を合計した土地の太陽電池導入ポテンシャルは 436GW と試算されており⁵⁾、農地の有効活

用により新規太陽光発電設置場所が確保できることが期待されている。営農型太陽光発電設備を設置するための農地転用許可件数は2014年の351件から2020年には3,474件と約10倍に増加され、累計面積は872.7ha(8.73km²)であり⁶⁾、年々市場は拡大されている。一方で、平板形状の太陽電池パネルを農地上部空間に設置した際、平板パネルの下部に日陰が発生するため作物に十分な日光が当たらず、農作物の収穫量低下につながる懸念がある⁷⁾。円筒形太陽電池は細長い円筒形状であるため適切な間隔を設けることで太陽光の透過と発電の両立が期待できる。Fig.1は、頭上に円筒形太陽電池を設置した場合と平板太陽電池を設置した場合の陰の出来方の違いを示している。円筒形太陽電池下では、木漏れ日のような光透過が実現出来る。

本実証では、環境制御可能な施設園芸ビニールハウス内に、円筒形状の太陽電池、平板形状の太陽電池を投影面積当りの開口率が50%になるように設置し、太陽電池下で育てられる農作物の収穫量および、太陽電池で得られた発電量を比較することで、円筒形太陽電池を評価した。

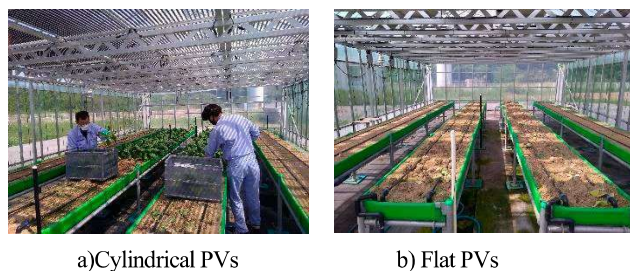


Fig.1 Landscape with PVs on top of crops.

2. 実験方法

2.1 評価に使用した太陽電池

太陽電池は、円筒形、平板形ともアモルファスシリコン型のフレキシブル発電シートを用いて作製した。

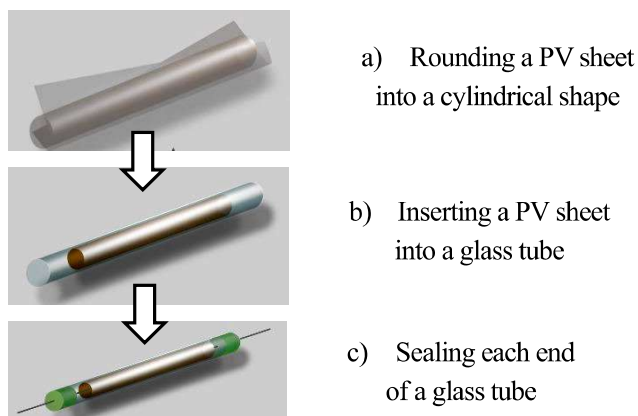


Fig.2 Fabrication Procedure for Cylindrical PV.

円筒形太陽電池の作製手順を Fig.2 に示す。フレキシブル発電シートをガラス管に封入して、配線を設けた後、ガラス管両端部を封止することで、作製した。更に円筒形太陽電池を20本接合することでモジュール化した。Fig.3 a)は作製したモジュールを2台並べたものである。

平板太陽電池はフレキシブル発電シートを封止材およびバリアフィルムでラミネート封止することで作製した。作製したフィルムはアルミシートに固定することで、モジュール化した。作製したモジュールを Fig.3 b)に示す。

作製したモジュール1台のTSC条件での特性を Table1 に示す。

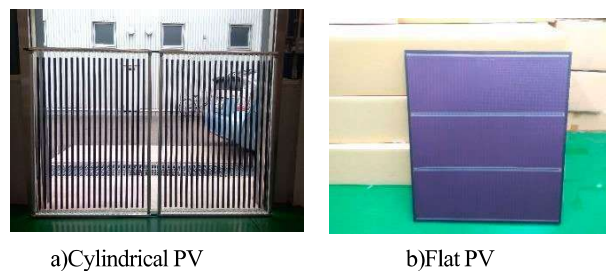


Fig.3 PV fabricated for testing.

Table 1 Power properties of each PV

	Cylindrical PV	Flat PV
Voc(V)	65.8	72.8
Isc(A)	0.79	0.59
Vpm(V)	51.6	54.5
Ipm(A)	0.60	0.49
Pmax(W)	32.5	26.7

2.2 評価に使用した施設園芸ハウス

農作物の育成・収穫量を再現性良く評価するために、ビニールハウス内で実証試験を行った。農作物の栽培方法として、連作障害が起きにくいとされる高床式砂栽培法を選定した。導入した施設園芸ハウスの外観を Fig.4 に示す。同サイズのビニールハウスを3棟製作し、太陽電池を設置しない基準棟、円筒形太陽電池を農作物上に設置した円筒形太陽電池評価棟、平板太陽電池を農作物上に設置した平板太陽電池評価棟を建設した(Fig.5)。施設園芸ハウスに設置した太陽電池は、平板、円筒とも、投影面積当りの開口率が50%になるように設置した。また、自動育苗装置、自動灌水装置による栽培時の液肥供給量の自動化、自動側窓カーテンによる室内温度調整を導入することで、太陽電池による遮光および日陰の影響以外の農作物育成条件を、各棟で同一になるように調整した。

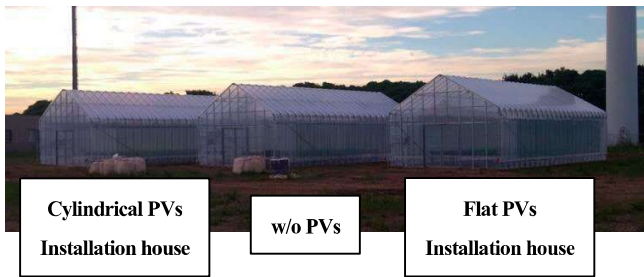


Fig.4 External view of horticultural greenhouses.

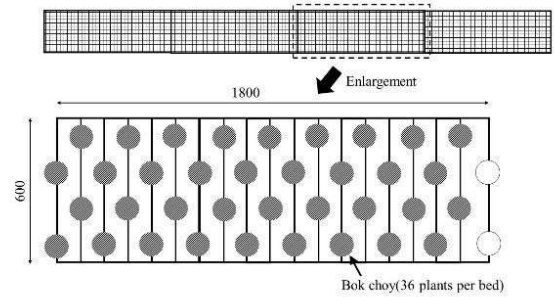


Fig.7 Location and quantity of Bok choy cultivated

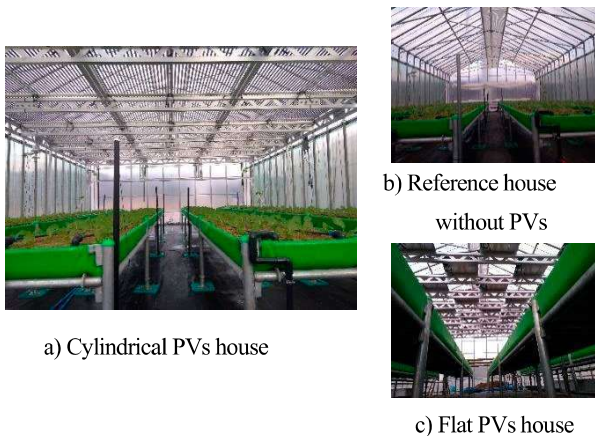


Fig.5 Constructed Agriphotovoltaics facilities.

2.3 農作物収穫量の評価方法

農作物はチンゲン菜を選定した。年間9作程度の収穫が可能であり、繰り返し評価が可能である。チンゲン菜は光飽和点が高い葉物野菜であり、ソーラーシェアリングに向いている農作物とは言い難いが、農作物上にある太陽電池による遮光・日陰の影響を受けやすい点で、太陽電池の形状の違いによる比較評価に適していると判断した。

各ビニールハウス内には600mm×1800mmの高床式砂栽培ベッドを16ベッド設置した。その中で、太陽光が側面から入射される割合が少ない中央～北側の6ベッドで栽培されたチンゲン菜のみを評価に使用した(Fig.6)。Fig.7のように、1ベッドに36株栽培することで、評価棟ごとに216株のチンゲン菜を栽培した。

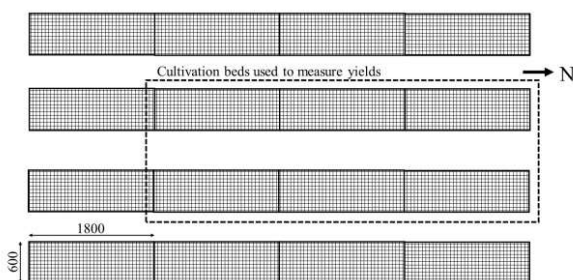


Fig.6 Arrangement of growing beds used in studies.

12月から8月までの冬～夏の期間において、4回の育苗、定植、栽培、収穫を行い、収穫時に216株全てのチンゲン菜の重量を測定した。太陽電池を設置していないビニールハウスを基準として、平均重量を比較評価した。また、3作目、4作目においては、太陽電池を設置しない基準棟のみ、透過率50%の遮光シートをチンゲン菜上部に設置した。

2.4 太陽電池発電量の評価方法

円筒形太陽電池および平板太陽電池の発電量評価方法を Fig.8 に示す。円筒形太陽電池は6モジュールを並列接続したものを一組として、マイクロPCS(パワーコンディショナーシステム)に接続することで、AC100/200V出力可能とした。6モジュールのSTC(標準試験条件)下の出力はDC195Wである。平板太陽電池は8モジュールを並列接続したものを一組として、DCコンバータで降圧した後にマイクロPCSに接続した。8モジュールのSTC下の出力はDC197Wである。得られた電力はゲートウェイの監視システムにより、モニタリング可能である。円筒形太陽電池アレイと平板太陽電池アレイの発電量を比較評価した。

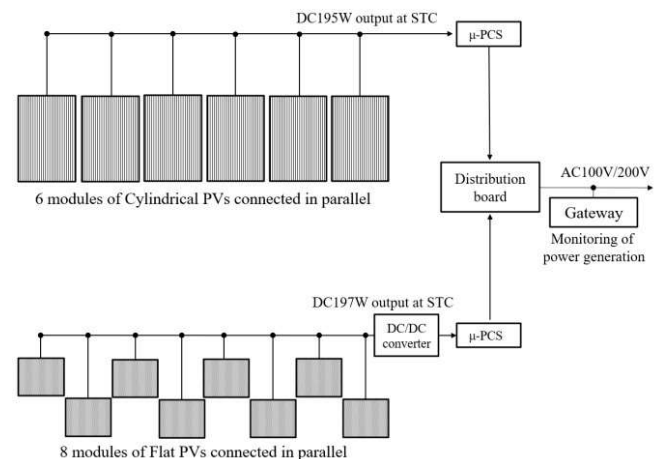


Fig.8 Methods for evaluating the quantity of electricity generated by PVs.

3. 実験結果および考察

3.1 農作物の収穫量

Table2 に、太陽電池未設置エリアのチンゲン菜栽培条件を示す。1,2,3 作目については、積算温度が 550~600 時間で収穫可能であったが、夏場の 4 作目については、積算温度 994 時間での収穫となった。4 作目のビニールハウス内平均気温は 29.2°C であったが、チンゲン菜の適正な生育温度は 15~25°C であり、35°C を超えると生育が抑制されるため⁸⁾、Fig.9 の通り、チンゲン菜にはカッピング(葉の湾曲症状)と呼ばれる育成障害が観察された。

Table 2 Cultivation conditions without PVs in a greenhouse

Times	Period.	Days	Avg. Temp.	Total Temp.	Total Solar Radiation
1	17 Dec - 13 Feb.	59	9.9	584	89.3
2	27 Feb - 6 Apr.	39	14.0	545	123.1
3	27 May - 20 June.	25	22.8	570	61.1*
4	6 Jul - 8 Aug.	34	29.2	994	79.5*

*Shading curtains were used only in buildings without PVs

Fig.10 に太陽電池未設置棟、円筒形太陽電池設置棟、平板太陽電池設置棟の栽培期間内の室内平均温度を示す。3 棟とも、同等の気温であり、太陽電池設置による、室内温度の変化は季節に関わらず、観察されなかった。



Fig.9 Bok choy with deformed leaves.

Fig.11 に 3 棟の室内の栽培期間内の平均相対湿度を示す。4 作目の平均湿度は、太陽電池未設置棟で 85.6%、円筒形太陽電池設置棟で 83.6%、平板太陽電池設置棟で 83.2% であり、太陽電池未設置棟が太陽電池設置棟よりも 2% 程高い結果であった。これは、太陽電池の有無の影響ではなく、太陽電池未設置棟にのみ、自動育

苗装置および液肥供給用の貯水タンクを設置しており、装置に貯めた液肥中水分の揮発の影響と考えられる。

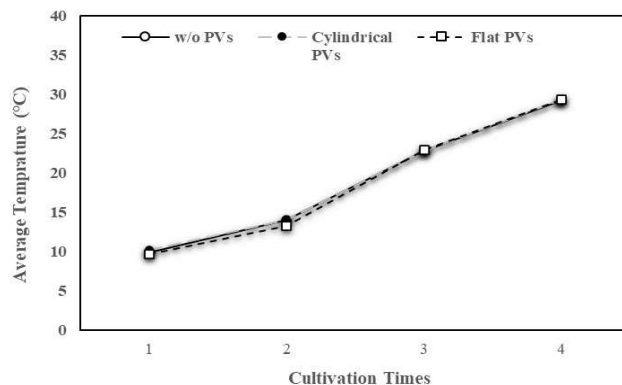


Fig.10 Average indoor temperatures.

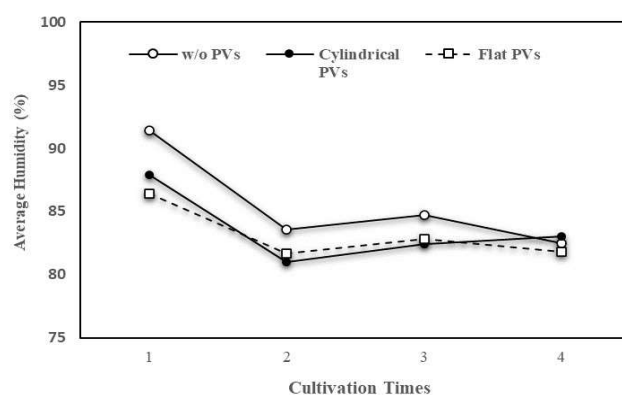


Fig.11 Average indoor relative humidity.

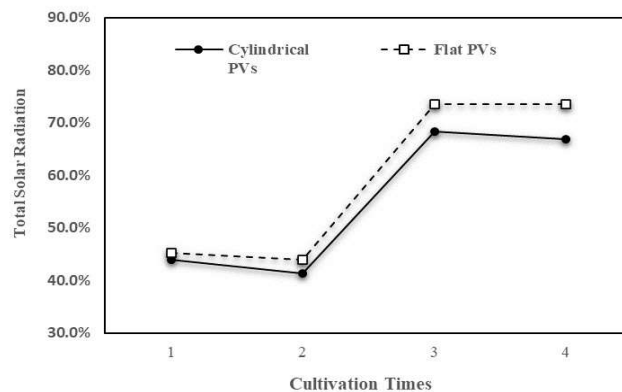


Fig.12 Cumulative solar radiation ratio based on uninstalled Greenhouses.

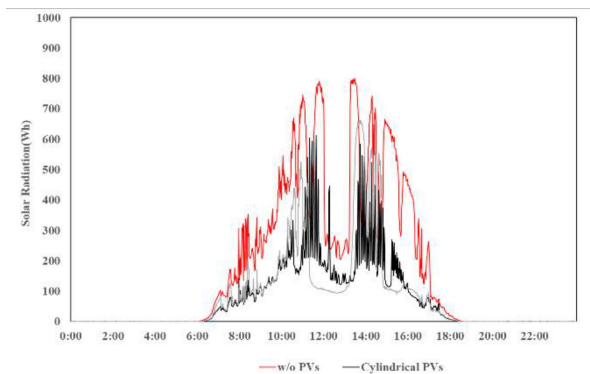
Fig.12 に太陽電池未設置棟の積算日射量を 100% とした時の、太陽電池設置棟の積算日射量比率を示す。1、2 作目は、太陽電池による光の遮光により、積算日射量は 50% を想定していたが、1、2 作目の平均は、円筒下で 42.7%、平板下で 44.6% となっており、想定値よりも低い光透過率であった。太陽電池を支える架台構造において、長尺となった梁の強度を保つために梁

にトラス形状を設けた。梁部により、一部の光が遮断された結果、積算日射量の低下が生じたと考えられる。

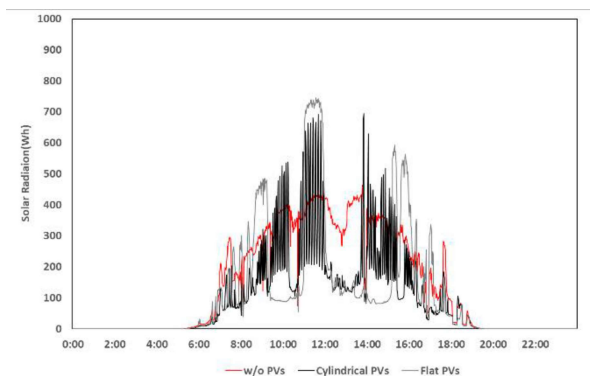
3作目、4作目は太陽電池未設置エリアに透過率50%の遮光シートが設置しており、1、2作目の透過率より、太陽電池設置棟の積算日射量は未設置棟の85%(円筒形下)、89%(平板下)を想定した。実際の3、4作目の平均積算日射量は、円筒下で67.7%、平板下で73.5%であり、どちらの棟も想定値よりも低い積算日射量であった。

Fig.13 に太陽電池未設置棟に遮光シートを使用していない3月27日と、遮光シートを使用した7月28日の一日の日射量の推移を示す。いずれも晴天日であった。3月27日において、3棟とも、12時~13時に著しく日射量が低下していることが分かる。

一方、7月28日においては、太陽電池設置棟においては、同様に12時~13時に著しく日射量が低下しているものの、太陽電池未設置棟については、日射量の低下が、3月27日に比べて、顕著に少なくなっていることが分かる。このことが、3作目、4作目における太陽電池設置棟の積算日射量が低下した原因であると考えられる。



27 March (without shading curtains)



28 July (with shading curtains)

Fig.13 Trends in solar radiation on a daily basis.

その後の点検で、12時~13時の日射量低下が、遮光シート要因であることが分かった。Fig.14の通り、シート使用時は遮光率50%となる反面、シートを使用し

ない場合は、ビニールハウス中央に畳んで収納されており、この部分が遮光部となった。太陽電池設置棟は夏場においても、遮光カーテンを広げないため、太陽電池未設置棟に比べ、積算日射量が低下する結果となった。



a) Folded up

b) Extension

Fig.14 Situation with shading curtains.

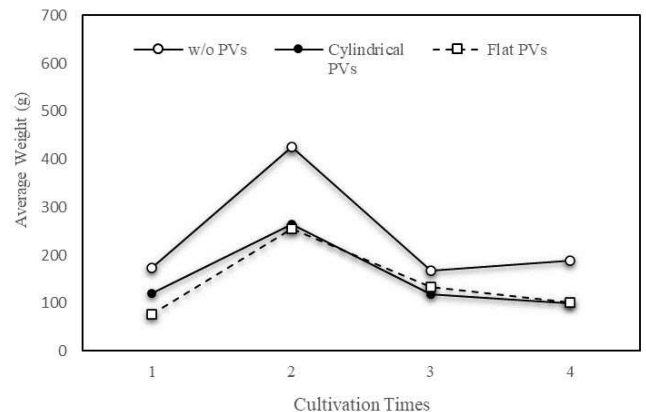


Fig.15 Average weight of Bok choy.

Fig.15 に3棟の1作目から4作目までに収穫したチンゲン菜の平均重量を示す。円筒形太陽電池設置棟、平板太陽電池設置棟とも、太陽電池未設置棟に比べ、平均重量が低下している。これは、光飽和点の高いチンゲン菜を栽培しているため、太陽電池の遮光による日射量の低下が大きな要因である。

平板太陽電池と円筒形太陽電池下での平均重量を比較評価した。平均重量を積算日射量で除した後、太陽電池未設置棟の値を100%として、相対比較評価した(Fig.16)。太陽電池未設置棟に遮光シートを広げていない1作目、2作目は、円筒形太陽電池設置棟で、それぞれ157%、150%、平板太陽電池設置棟でそれぞれ、98%、136%であり、太陽電池による遮光率を同一にした場合、平板に比べ、円筒形太陽電池設置下で高い収量が得られる結果であった。単純計算では、円筒形下の場合、遮光率35%未満、平板下の場合、遮光率15%未満にすることで、太陽電池未設置棟と同等の収量が得られる計算となる。

太陽電池未設置棟で、遮光シートを広げた3作目、4作目において、円筒形太陽電池設置棟でそれぞれ103%、78%、平板太陽電池設置棟で109%、73%であっ

た。3 作目の結果は、遮光率 50%の太陽電池は、遮光率 50%の遮光シートと同等の役割を示すものであった。一方、4 作目においては、太陽電池設置棟の積算日射量あたりの重量は太陽電池未設置棟を 20%以上、下回る結果となり、太陽電池の遮光率を変えても、太陽電池未設置棟と同等の収量を得ることが出来ないことを示す結果であった。夏場の高温時において、太陽電池を遮光シートの代わりに使用することで収量を確保することは実現出来なかった。

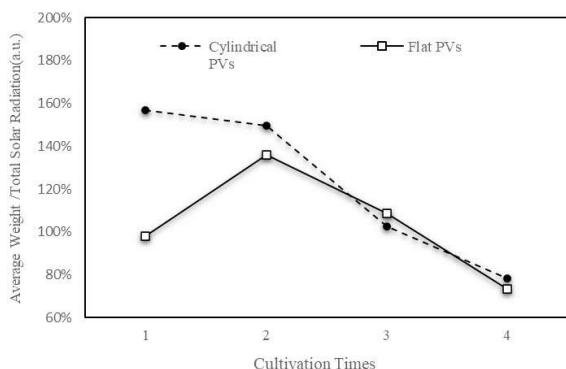


Fig.16 Average weight per total solar radiation of Bok choy based on greenhouses without PVs.

夏場に遮光のない直射日光下で栽培不良が生じた例は、光飽和点のないトウモロコシにおいても報告がある。太陽光の直射により葉が高温になり、根から吸い上げた水分が蒸散・冷却のみに使用された結果、光合成に必要な水不足により成長が阻害されたと推測されている⁹⁾。

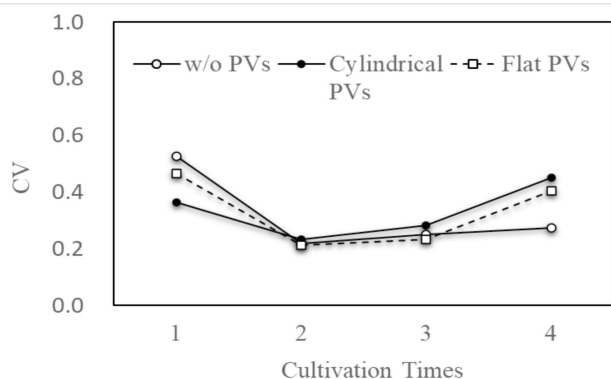


Fig.17 Comparison of coefficients of variation.

最後に、収穫されたチンゲン菜の重量のばらつきを評価した。太陽電池の設置の有無により平均重量が異なるため、平均重量を標準偏差で除した、変動係数(CV)で比較評価した(Fig.17)。重量のばらつきは、1 作目(冬)と4 作目(夏)に、大きくなる傾向があった。太陽電池下で上手く栽培が出来なかった4 作目を除くと、1, 2, 3 作目の変動係数は円筒形下でそれぞれ、0.365、0.233、0.281、平板下でそれぞれ、0.464、0.213、0.232

であり、3 作目を通すと、円筒形太陽電池下で育成することで、チンゲン菜重量のばらつきが小さい結果が得られた。場所毎の光むらを作り難いことが、重量ばらつきの低減に寄与していると考えられる。

3. 2 太陽電池の発電量

7月12日から8月15日までの一日ごとの発電量を Fig.18 に、累積発電量を Fig.19 に示す。円筒形太陽電池、平板太陽電池とも投影面積 50%になるよう設置した時、曇・雨天時の発電量に差は見られない反面、晴天時は円筒形太陽電池で高い発電量が得られた。累積発電量において、円筒形太陽電池は平板太陽電池の 1.23 倍高い発電量が得られた。

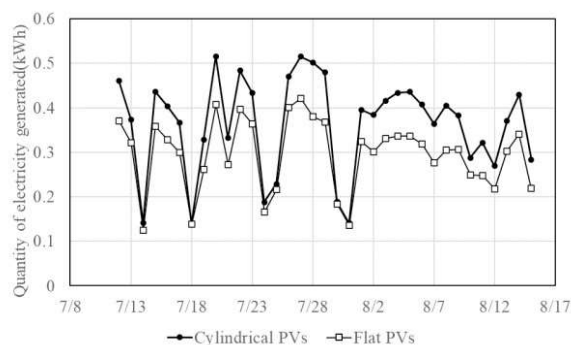


Fig.18 Daily electricity generated from 12 July to 15 August.

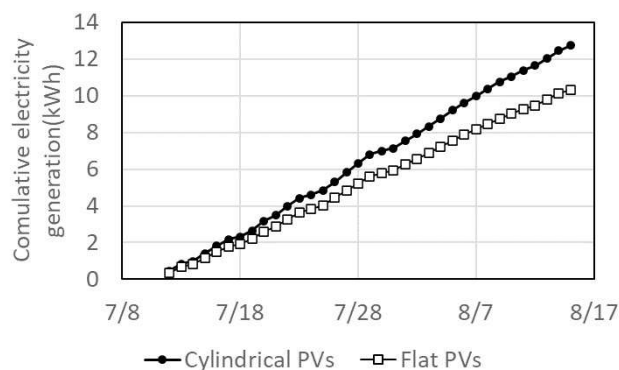


Fig.19 Total electricity generated between 12 July and 15 August.

晴天日であった7月28日の発電量の推移を Fig.20 に示す。円筒形太陽電池は平板太陽電池に比べて、7時から10時30分、14時から18時の朝・夕の期間で特に発電量が高いことが分かる。一日の発電量について円筒形太陽電池は平板太陽電池の 1.25 倍であった。

屋外設置した円筒形太陽電池とビニールハウス内に設置した円筒形太陽電池の発電量について、比較した。Fig.21 に7月26日から8月15日までの累積発電量を示す。円筒形太陽電池をビニールハウス内に設置することで屋外設置に比べて、発電量が、45%に低減した。

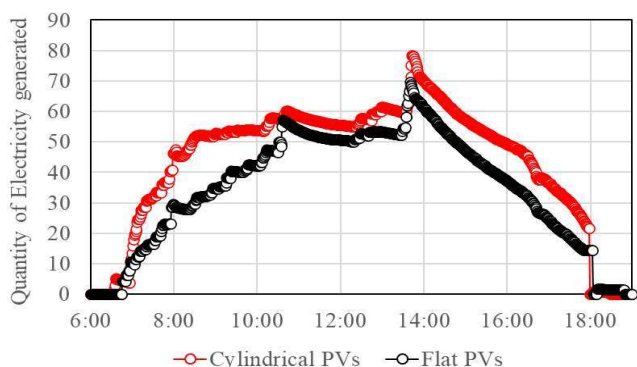


Fig.20 Daily electricity generated between cylindrical PVs and Flat PVs on 28 July.

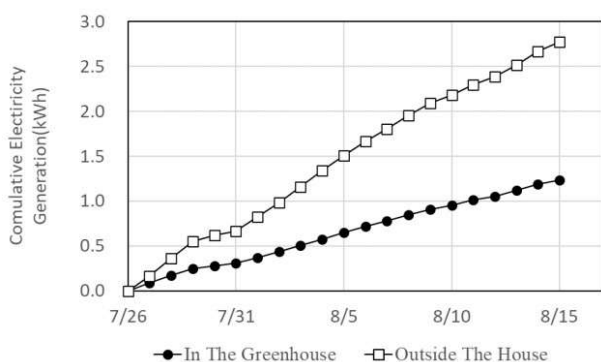


Fig.21 Total electricity generated between 26 July and 15 August.

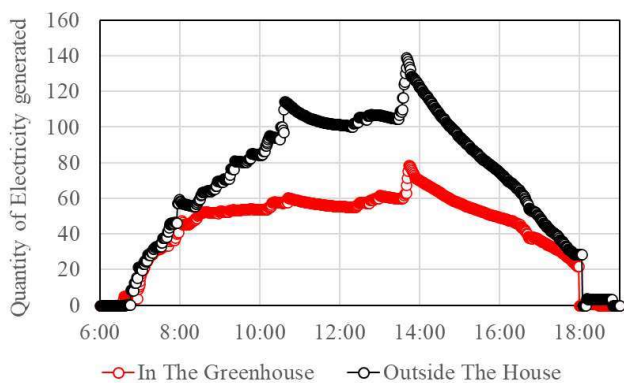


Fig.22 Daily electricity generated by cylindrical PVs at different installation sites on 28 July.

Fig.22 に 7 月 28 日の発電量推移を示す。ビニールハウス内に設置することで、一日を通して、発電量が低下していた。発電量の低下は、ビニールハウスを構成する梁で生じる陰の影響が大きいと考えられる。

今回の実証試験においては、太陽電池の形状により生じる陰が農作物に与える影響を主眼に置いて、太陽電池をビニールハウス内に設置したが、実用の際には、太陽電池をビニールハウス外枠に取り付けるような設置工法が必要である。

4. 結論

これまでに得られた実験結果を要約すると、次の通りである。

- 1) チンゲン菜に遮光シートを広げる必要のない 1 作目～2 作目(冬～春)において、遮光率を同率にした時、平板太陽電池に比べて、円筒形太陽電池下で高い収量が得られる試算を得た。
- 2) チンゲン菜に遮光シートを広げた時、適正な生育温度環境下では、太陽電池と遮光シートの遮光率が同率の場合、同等の収量が見込まれる結果を得た。
- 3) 夏場の生育限界近くでチンゲン菜を育てた時、太陽電池と遮光シートの遮光率が同率の場合でも、太陽電池下で収量が低下する結果であった。遮光されない強い直射日光が連続的に照射されることで、チンゲン菜の育成不良が生じた。
- 4) 夏場以外の 1 作目から 3 作目において、平板太陽電池下に比べて、円筒形太陽電池下で育てることで、チンゲン菜の重量ばらつきを低減することが出来た。平板に比べ、円筒形の方が場所毎の光むらを作り難いことに起因すると考えられる。
- 5) 投影面積下の開口率を 50%に統一した時、円筒形太陽電池の発電量は、平板太陽電池の 1.23 倍高かった。特に朝と夕方が高い発電量が得られた。
- 6) 円筒形太陽電池をビニールハウス内に設置した場合、屋外設置に比べて、発電量は 45%に低減した。実用化の際には、円筒形太陽電池をビニールハウス外枠に取り付けるような設置工法が必要である。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP10020)の結果得られたものです。

共同開発機関として、電気通信大学、協力機関として、CKD 株式会社、ウシオ電機株式会社に参画頂きました。また、ビニールハウスの設計・製作は、株式会社茂広組、チンゲン菜の育成指導は、株式会社グリーンファームのご支援の下、実施いたしました。

関係者の皆様に、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) IEA-PVPS : Snapshot of Global PV Markets 2022, T1-42(2022), 10-11
- 2) 資源エネルギー庁：国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案, 70(2021), 5

- 3) Akita Noriko : Journal for Interdisciplinary Research on Community Life, 7(2016), 72-76
- 4) 環境省：太陽光発電事業の環境保全対策に関する自治体の取組事例集, 4(2016), 1-14
- 5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：NEDO再生可能エネルギー技術白書, 2(2013), 30
- 6) 農林水産省：営農型太陽光発電について, 8(2022), 6
- 7) 千葉大学倉阪研究室, NPO法人地域持続研究所：ソーラーシェアリング全国調査結果報告書, 2(2019), 9-23
- 8) 秋田県農林水産部：あきたブランド野菜づくりの手引き, 3(2007), 210
- 9) 長島 彬：ソーラーシェアリングのすすめ,1(2015), 82-93