

Non-tracking solar concentration performance of triangular pyramid shape with mirrors

Yugo TANAKA

Atsushi AKISAWA

Masayuki NAKAYAMA

ミラーを用いた三角錐型非追尾太陽光集光方式の集光性能

田中 悠悟^{*2}秋澤 淳^{*1 ‡}中山 政行^{*2}

Abstract

This study proposes a photovoltaic(PV) module which is in the shape of triangular pyramids consisting of flat mirrors and PV cells. The mirrors provide not only solar concentration but also sun tracking function even though the module is fixed. It is expected to have the effects of increasing solar collection on to the cells and reducing installation area because the modules will be set on the ground without any space between them. The objectives of this study are to evaluate the performance of the proposed module in terms of annual solar collection and to derive appropriate design of the pyramid shape. Ray-tracing simulation was employed to analyze the effect of the triangular pyramid design. Two kinds of index were defined, that is, solar collection per cell area and that per installation area. The results show that it is possible to find out the design cases to increase both indexes compared with a conventional PV panel setting. It is also found that there is pareto optimum set which gives the best performances with trade-off relationship between the two indexes. According to the results, the solar collection per cell area can be improved by 25% while that per installation area by 55% at the maximum. The strategies to design appropriate triangular pyramids were derived from the pareto optimum set. Another design strategy was also examined, which enhances the solar collection especially in the morning and late afternoon. Some design cases achieve the improvement in such point of view, which verifies the ability of sun tracking with fixed structure of the proposed module.

Keywords: Solar concentration, Triangular pyramid, Mirror, Sun tracking, Photovoltaic cells

キーワード： 太陽集光, 三角錐, ミラー, 太陽追尾, 太陽光発電セル

1. はじめに

これまで一般的に導入されてきた太陽光発電 (PV) パネルは平板型のものである。発電出力を増強するにはパネル面積あたりに受ける日射量を増やすことが有効である。その方法として、PVセルの外側の日射をミラーまたはレンズを用いてセルに当てる各種集光方法が開発されている⁽¹⁾。

発電出力を高めるためにレンズやミラーを用いて太陽日射を500~1000倍に高密度に集光し⁽²⁾、極めて高効率なPVセルに照射する方式が実用化されており、砂漠のように日射条件のよい土地に設置されている⁽³⁾。一方、低密度な集光方式も存在する^(4,5,6)。このように太陽光を集光する場合

は、機械的に太陽に正対するように調整される^(7,8,9)。

追尾装置を使わずに固定されたままで集光する方式⁽¹⁰⁾もあり、追尾装置が不要な点で有利である。しかしながら、集光できる方向に制限があるのが一般的である。代表的なミラーによる複合放物面鏡 (CPC) 形状^(11,12,13)では、許容入射半角内に入る日射が集光されるが、それを外れると集光性能が大きく低下する。放物面でなく双曲線形状ミラーの設計例⁽¹⁴⁾もある。平板ミラーをPVモジュールの前面に固定設置した簡易な方式⁽¹⁵⁾や、平面ミラーを箱状に配置した集光集熱器⁽¹⁶⁾も提案されている。Leutzらはフレネルレンズにおいて、南北方向と東西方向にそれぞれ許容入射半角を持つ設計法を提案している⁽¹⁷⁾。レンズの場合でも固定式の場合は有効な集光範囲が限定される点は同じである。

*1 Professor, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo, 184-8588, Japan
‡e-mail: akisawa@cc.tuat.ac.jp

*2 Graduate School of Bio-Applications and Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
Received: 10 January 2020, Accepted: 16 March 2020

*1 東京農工大学大学院工学研究院 教授 (〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16)
‡ e-mail: akisawa@cc.tuat.ac.jp

*2 元東京農工大学大学院生物システム応用科学府
(原稿受付: 2020年1月10日, 受理日: 2020年3月16日)

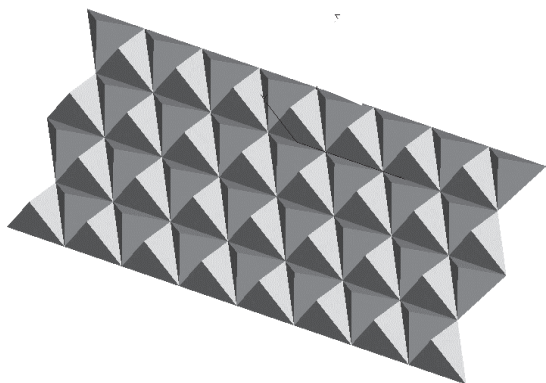


Fig. 1. Novel PV module with triangular pyramid shape.

本研究ではCPCやフレネルレンズとは全く形状が異なる，三角錐の斜面にPVセルと平面ミラーを配置し，その三角錐を隙間なく並べた3次元形状の集光PV方式を提案する（図1）．PVセルの表面に逆ピラミッド形状をしたマイクロな窪みを形成することによってセルが光を取り込む効率を上げる研究例⁽¹⁸⁾があるが，図1のようなマクロなピラミッド構造を持たせた集光方式はこれまでに見当たらない．三角錐が並んでいることから南向きのセルに加えて南東向きと南西向きセルが存在する．したがって，太陽の位置が南からずれている場合にも有効に機能するセルがあるだけでなく，セルにミラーが相対しているので，ミラーで反射してセルに日射が当たる機能も持っている．すなわち，集光と追尾を併せ持つ特性が期待される．また，斜めに設置された従来のPVパネルでは，隣のパネルに影がかからないように南北方向にある間隔を空ける．一方，提案する三角錐型PVモジュールは平面状に敷き詰めることから，設置面積あたりの集光量を増大させる可能性も考えられる．言い換えれば，提案するPVモジュールは限られた資源であるセルや立地する土地を有効活用するモジュール形状と解釈できる．

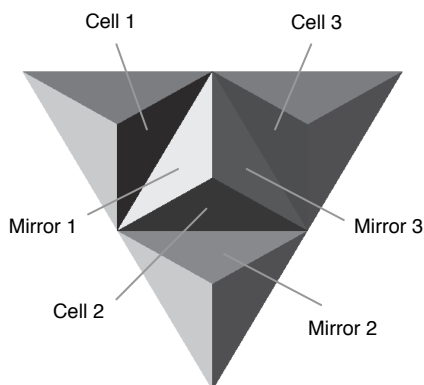
そこで，本研究では，提案する三角錐型形状をした集光モジュールの集光性能を明らかにするとともに，性能を高める形状を見出すことを目的とする．

2. 三角錐型太陽集光モジュール

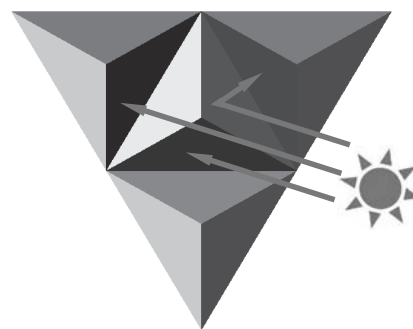
2.1 モジュールの構造および特徴

提案するモジュールを図2に示す（図の下方向が南）．中心となる三角錐とその周辺に配置される3つの三角錐が組み合わされる．中央の三角錐については，南側斜面にPVセル，北側の2つの斜面にミラーが設置される．周辺の三角錐は北側にミラーが，南側の2つの斜面にPVセルが配置される．基礎単位となるのは，中心の三角錐に隣接する三角形のセルまたはミラーから構成される六角形である（図2(a)）．この六角形が隙間なく平面を覆う形となる．

太陽の位置が東側にあり，本モジュールに斜めに日射が入る状況を図2(b)が示す．セル1およびセル2には直接日射



(a) Structure of proposed module



(b) With incident from east side

Fig. 2. Sun tracking ability with fixed flat mirrors and PV cells.

が当たる一方，ミラー3に入射した日射が反射されてセル3に当たる．太陽が西側にある場合はその逆となる．この動作から，本モジュールのセルとミラーは固定されているにもかかわらず，太陽が移動しても各セルは一定程度の日射を受けられ，擬似的な追尾機能を有すると期待できる．

本提案モジュールの特徴は次の通りまとめられる．

- ① セル・ミラーともに固定式でありながら太陽を擬似的に追尾する機能を持つ．
- ② ミラーを用いた集光により高価なPVセルの使用を削減できる．
- ③ モジュールを平面状に隙間なく配置するため，建物屋上などの設置場所を最大限に活用できる．

なお，三角錐形状は強度が見込め，モジュール自体の自立性を高め，従来のような架台が不要となる可能性も考えられる．また，形状が幾何学的に相似形であれば理論的に同じ集光性能を持つので，製造可能な範囲で大きさを自由に選ぶことができる．言い換えると，プレス加工のような製造法で大面積に多数の小さい三角錐形状を一度に製作し，塗布型のPVセルを表面に加工すれば，大量生産にも適している可能性がある．

2.2 三角錐形状の設計

いずれの三角錐も底面が同一の二等辺三角形をしている．前述の通り三角形の大きさは相似的に縮小・伸長可能であり，形状のみが本質的である．底面の三角形に対し，対称性から三角錐の頂点は二等辺三角形の頂角の2等分線

上にあるとした。三角錐の頂点の位置を決めれば三角錐の形状が決定される。そこで、二等辺三角形の頂点を起点とする稜線と底面がなす角度、二等辺三角形の底辺から立ち上がる斜面と底面がなす角度を与えることとした。すなわち、次の3つが三角錐の設計パラメータとなる。

- ・ θ_1 : 底面の二等辺三角形の頂角
- ・ θ_2 : 斜面（セル2またはミラー2）と底面がなす角
- ・ θ_3 : 頂点からの稜線と底面がなす角

ここで、中心の三角錐と周辺の三角錐の形状を同一とする必然性はない。望ましいモジュール形状を導き出すには原理的に自由度を高くとる方が有利なはずなので、ここでは中心と周辺の三角錐は異なることを前提とした。ただし、底面の二等辺三角形は同一形状である必要がある。したがって、二等辺三角形の頂角は共通となり、独立した設計変数は5つとなる。

2.3 集光性能の評価指標

提案するモジュールの集光性能を次の2つの指標で評価する。

- ・ セル面積あたり集光量
- ・ 設置面積あたり集光量

前者はセルに入射する集光密度を表しており、セルがどれだけ有効に稼働するかを示すとともに、ミラーによる集光の効果が示される。後者はモジュールが設置される土地面積あたりの集光密度を表し、ミラーも含めたモジュールによる土地の有効利用度を意味する。提案モジュールは土地全体を覆う設置形態になることから、後者の指標はその効果が表れると期待される。

提案モジュールの比較対象として、従来の平板型PVパネル（南向き、傾斜角30度）をとる。パネルの影の影響が出ないように通常パネルの南北間は隙間を空けることを考慮し、間隔はパネル高さの2倍の距離を設定した。

3. 三角錐型太陽集光モジュールの集光性能評価

3.1 設計および評価の方法

集光性能の評価対象は、図2に示す中央の三角形とそれを取り囲むミラーから構成される6角形（1ユニット分）である。まず、どのような設計が有効か不明であることから、5つの設計変数を様々に与えて集光性能を評価する。各変数に5通り値を設定したとしても設計ケースは $5^5=3125$ 通りの数となり、全てを解析するのは現実的でない。そこで、216ケースの評価を行ったのち、回帰分析を行い、予測式を作成した。その予測式を用いて5600通りの設計に対する性能を推定し、有効な設計方法を探索する方法をとった。

集光性能の計算にはレイトレーシングツールTraceProを用いた。モジュール評価に関する条件は次の通りである。

- ・ 設置場所：東京
- ・ 設置方位：南向き
- ・ ミラー反射率：95%（入射角度によらず一定値）

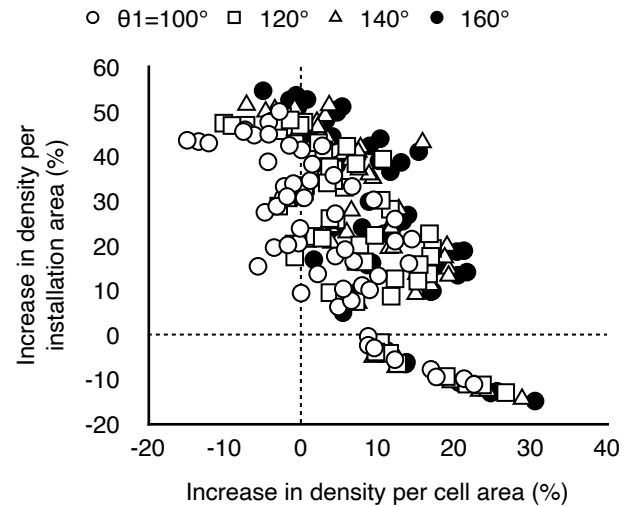


Fig. 3. Performance of solar collection by various design settings.

- ・ 計算日：各月代表日（10日、20日、30日）

なお、光源は平行光としてモデル化し、直達光のみを評価し、散乱光や地面等からの反射は考慮していない。偏光も取り扱っていない。直達光以外を無視していることから安全側の評価になっていると解釈できる。一方、セルは完全吸収体としてモデル化した。実際にはセルの反射率に入射角依存性がある点を考慮することが課題である。

3.2 年間集光量の推定

最初の216ケースは次の通り設計変数を組み合わせた。 θ は中心の三角錐、 θ' は周辺の三角錐の角度を表す。

$$\theta_1 (= \theta'_1) : 100, 120, 140, 160 \text{ 度}$$

$$\theta_2 : 20, 40, 60 \text{ 度}$$

$$\theta'_2 : 20, 40 \text{ 度}$$

$$\theta_3, \theta'_3 : 20, 40, 60 \text{ 度}$$

レイトレーシングシミュレーションによって得られた集光量を従来型の集光量と比較した増分として整理した。その結果を図3に示す。横軸がセル面積あたり集光量の増分、縦軸が設置面積あたり集光量の増分を表す。原点が従来型の性能を意味する。

グラフより第一象限に多数のプロットがあり、2つの指標ともに従来よりも改善できることがわかる。セルあたり集光量の指標を30%改善する設計もあるが、この場合には設置面積あたり集光量の指標がマイナスとなる。一方、設置面積あたり集光量の指標を50%以上改善する設計もあるが、その場合にはセルあたり集光量の指標がゼロまたはマイナスであり、改善が見込めない。第一象限にあるプロットを見ても2つの指標間にはトレードオフ関係があることが示唆されている。なお、プロットは θ_1 によって区別されているが、 $\theta_1=160$ 度の設計が第一象限で相対的に外側に位置し、最もよい性能を与える集団を形成している。

3.3 設計パラメータを拡張した性能推定

前述の216ケースの計算結果にガウス過程回帰（二乗指数GPR）⁽¹⁹⁾を当てはめて推定を行った。推定値と実際の値

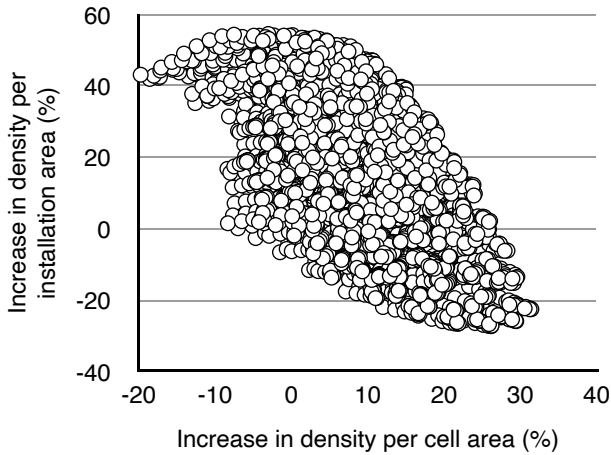


Fig. 4. Estimated performance with extended design cases.

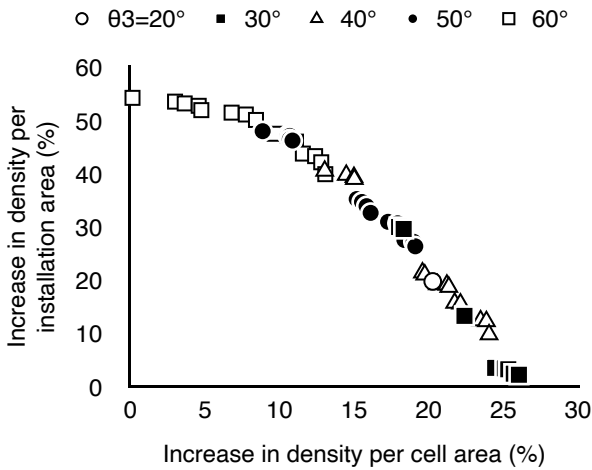


Fig. 5. Cases in the pareto optimum set.

(レイトレーシングによるシミュレーション値) の関係はほぼ $y=x$ の直線に乗っており ($R^2=0.99$)、本推定手法はよい当てはめができていると判断された。

この結果を受けて、設計変数を次の通り拡張した。これらの値を推定手法に代入することによって性能指標を計算し5600ケースの予測値を得た。

- $\theta_1 (= \theta_1')$: 100~170度 (10度刻み)
- θ_2 : 10~70度 (10度刻み)
- θ_2' : 10~40度 (10度刻み)
- θ_3 : 20~60度 (10度刻み)
- θ_3' : 20~60度 (10度刻み)

予測結果のプロットを図4に示す。 θ_1 の値が同じでも他の設計パラメータが変わることによってプロットは全体的に分布する。第一象限の分布からセルあたり集光量と設置面積あたり集光量の間にはトレードオフ関係があることが明確に見て取れる。一方の指標の軸がゼロとなる条件から、セルあたり集光量は従来型より25%程度、設置面積あたり集光量は50%程度の向上が可能と予想される。設置面積あたりの性能向上の条件を緩和すれば、セルあたり集光量を従

Table 1 Selected cases form the pareto optimum set.

Case		A	B	C	D
Center (°)	$\theta_1 = \theta_1'$	170	170	150	150
	θ_2	50	50	40	70
	θ_3	60	50	20	30
Outer (°)	θ_2'	40	40	40	20
	θ_3'	20	50	60	50
Performance (%)	per cell area	0.3	10.5	19.5	26.0
	per land area	55.7	46.6	18.8	2.9

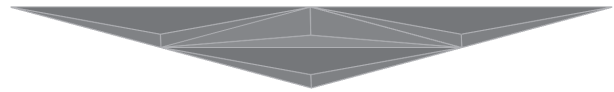


Fig. 6. Shape of the case C.

来型よりも30%増加させることも可能となる。

第一象限の最も縁にあるプロットが2つの指標のパレート最適集合を形成している。その集合を抽出し、 θ_3 によって区別したプロットを図5に示す。セルあたり集光量が多いところに $\theta_3=30\sim40$ 度のケースが分布し、設置面積あたり集光量が多いところに $\theta_3=60$ 度のケースが分布している。言い換えると、中央の三角錐の南側斜面 (セル2) の面積が大きいと設置面積あたりの指標が優位となり、斜面が小さいとセルあたりの指標が優位となる。斜面が受光部となることから、 θ_3 の影響は受光部面積の変化として理解できる。

4. 有効な三角錐形状の性能比較

4.1 セル面積あたり集光量と設置面積あたり集光量を指標とした設計

前述のパレート最適集合の中から表1に示す4つのケースを抽出した。性能指標については予測値ではなく、レイトレーシングシミュレーションをやり直した結果を示す。ケースAは設置面積あたり指標のみ改善する設計である。ケースBはセルあたり指標を約10%改善するが、中心と外側の三角錐の形状はほぼ同じ設計となっている。ケースCはどちらの指標も20%程度向上できる設計である。ケースDはセルあたり指標の向上を主とした設計である。セル2の斜面傾斜が70度と大きい一方でミラー2の斜面角度が20度と小さく、ミラー2の面積が大きく取られている。ミラーを大きく取ることによってセルへの集光効果を高めると考えられる。

結果として、いずれの設計でも三角錐の底面形状は頂角が大きく開いた三角形になることが導かれた。どちらの指

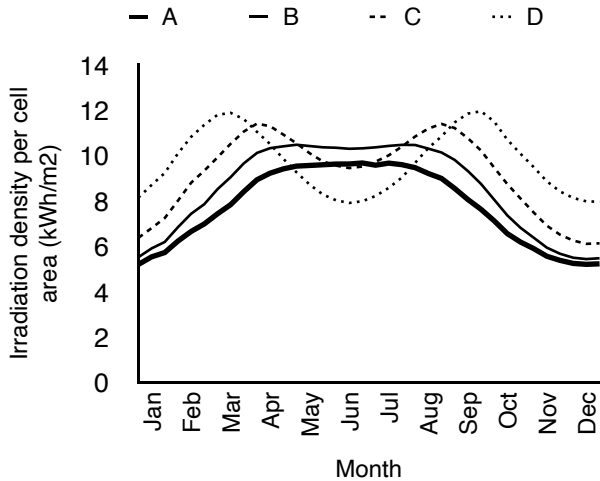


Fig. 7. Annual performance of each selected case.

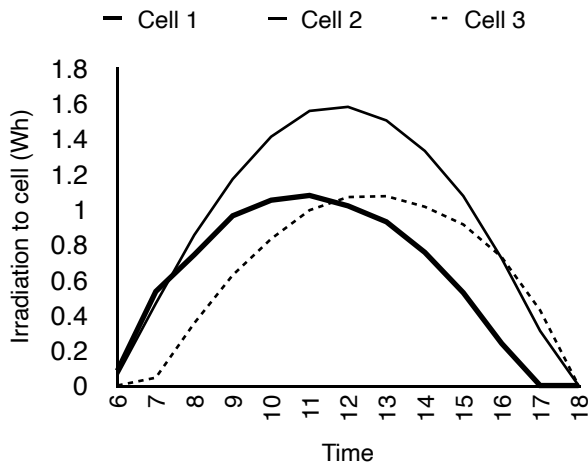


Fig. 8. Daily performance of Case C (20 March).

標も中間的なゲインのあるケースCの場合について、得られた形状を図6に示した。比較的横に広がった三角形の底面を持つピラミッドから構成されている。

この4種類のケースについて、セル面積あたり集光密度の年間の変化を図7に示す。ケースDでは春秋の中間期にピークを持ち、夏冬において集光密度が低下する特性を持っている。それに対し、ケースAでは5月から8月にかけて緩やかなピークを持ち、冬に低下する。中間的なケースBおよびCではその中間をとる傾向が見て取れる。ケースAとケースDを比較すると、ケースDは夏期にケースAよりも集光密度が悪化するが、中間期および冬期に大きく改善し、年間の性能を向上させている。中間的なケースCについて、3月20日を例にとり一日におけるセル毎の集光の様子を図8に示した。南向きのセル2は昼にピークを持つ一方、セル1とセル3は集光に1~2時間の時間差がある集光性能が見て取れる。

4.2 朝夕の集光密度を強化する設計

提案する三角錐型モジュールの特徴の一つは固定でありながら太陽を追尾する能力があることである。その点に注目し、朝 (6:00~9:00) と夕方 (16:00~18:00) のセルあ

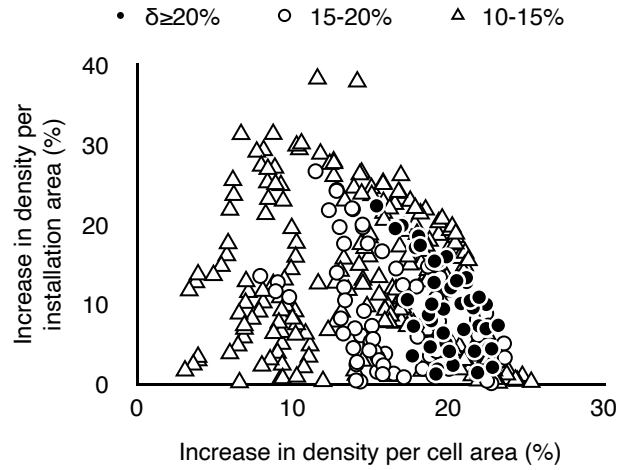


Fig. 9. Performance of design cases with δ more than 10%.

Table 2 Performance of the case with maximum δ (=24.1%).

Triangular pyramid	Angle	θ_1, θ_1'	θ_2, θ_2'	θ_3, θ_3'
	Center (°)		110	60
Outer (°)		110	40	60
Performance (%)	per cell area	20.8		
	per land area	10.1		

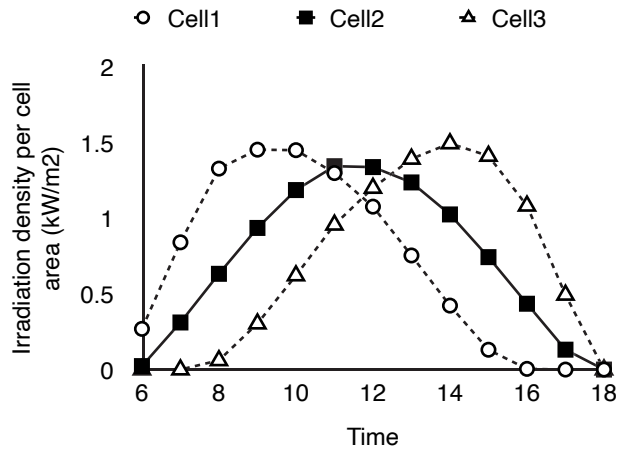


Fig. 10. Daily solar collection behavior of the case with maximum δ (annual average).

たり集光量を指標とした評価を行った。評価指標 δ を当該時間帯について従来型のPVパネルと比較した集光密度の増加率と定義する。

最初の216ケースの δ を算出し、前述と同様にガウス過程回帰を用いて設計パラメータを4177ケースに拡張した。その結果から δ が10%を超えるケースをプロットしたものを図9に示す。 δ が20%を超えるケースがセルあたり集光量が比較的大きいゾーンに分布している。なお、セルあたり集光量・設置面積あたり集光量では同等でも δ が大きく異なっていることがわかる。すなわち、擬似的な追尾機能を

持たせる設計は2つの指標を悪化させることなく追加的に可能であると解釈できる。これは設計自由度が高い提案方式の大きな特徴といえる。

δ が最大(24.1%)となる設計を表2に、1日の集光密度の時間変化(年間平均)を図10に示す。セル1およびセル3がそれぞれ午前中と午後にピークを取るとともに、セル2が正午にピークを取り、集光が時間帯に応じて強化されている様子が見て取れる。一方で、セル1は午後に、セル3は午前中にも日射を得ており、ミラーによる擬似的追尾能力が表れている。年間平均値に関し、結果として1日のどの時間帯においても従来型よりも集光密度が高い結果を与えている。

5. おわりに

本研究では平板ミラーとPVセルを三角錐形状に組み合わせ、集光と擬似的な太陽追尾を取り入れた新しいPVモジュールを提案し、その集光性能をレイトレーシングシミュレーションによって解析した。その結果、セル面積あたり集光量と設置面積あたり集光量のいずれも従来の平板型PVパネルよりも改善できる設計が可能であることを明らかにした。

セル面積あたり集光量と設置面積あたり集光量の間にはトレードオフ関係があり、片方の指標を改善する設計では他方の指標が低下する。性能の予測結果から、セル面積あたり集光量は最大約25%、設置面積あたり集光量は最大約55%の向上が見込まれる。いずれも三角錐の底面の三角形の頂角が150~170度を開いた形状となる。セル面積あたり集光量を拡大する設計では、中央の三角錐の南向きセル面積が小さく、それに相対するミラーを大きく取る形状が有効であるとの設計指針が導かれた。

また、朝と夕方の集光密度を高める指標に基づき設計を評価した結果、従来型よりも20%以上改善する設計が導かれた。この設計では午前・正午・午後の時間帯ごとに各セルの集光密度が増減し、固定でありながら擬似追尾機能を持つ提案モジュールの特徴が明確に示された。

以上より、本提案の三角錐型PVモジュールは集光によってセルの稼働を高めると同時に、平面状に敷き詰められる特徴によって設置する場所を効率的に活用でき、従来の平板型PVパネルに比べて有効であることが示された。ただし、表面が凹凸形状をしているため外部に剥き出しにするには適していない。ミラーやPVセルの保護も含め、ガラスカバーで覆うなどの対策が必要と考えられる。

また、今回は1ユニットのみの評価であるが、実際には多数のユニットが2次的に配置されるため、ユニットが複数隣接した状況での集光性能の評価が課題である。さらに、本システムはPVモジュールであることから、集光性能から発電性能の評価に拡張することが求められる。1ユニットに含まれる3つのセルが最も機能する接続形態を見出すことが課題である。

6. 参考文献

- 1) Katie Shanks, S. Senthilarasu, Tapas K. Mallick, Optics for concentrating photovoltaics: Trends, limits and opportunities for materials and design, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **60**, 394-407 (2016).
- 2) Pedro Pérez-Higueras, Juan P. Ferrer-Rodríguez, Florencia Almonacid, Eduardo F. Fernández, Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **94**, 143-153 (2018).
- 3) Geoffrey S. Kinsey, Kenneth Stone, Joseph Brown, Vahan Garboushian, Amonix CPV solar power plants, Proc. of 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (June 2010), 820-822, Honolulu, USA.
- 4) V. Poulek, A. Khudsh, M. Libra, Innovative low concentration PV systems with bifacial solar panels, *Solar Energy*, **120**, 113-116 (2015).
- 5) Mohamed Sabry, Prismatic TIR (total internal reflection) low-concentration PV (photovoltaics)-integrated façade for low latitudes, *Energy*, **107**, 473-481 (2016).
- 6) Runsheng Tang, Xinyue Liu, Optical performance and design optimization of V-trough concentrators for photovoltaic applications, *Solar Energy*, **85**(9), 2154-2166 (2011).
- 7) George Cristian Lazaroiu, Michela Longo, Mariacristina Roscia, Mario Pagano, Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption, *Energy Conversion and Management*, **92**(1), 143-148 (2015).
- 8) A novel algorithm for single-axis maximum power generation sun trackers, *Energy Conversion and Management*, **149**(1), 543-552 (2017).
- 9) Sebastián Gutiérrez, Pedro M. Rodrigo, Energetic analysis of simplified 2-position and 3-position North-South horizontal single-axis sun tracking concepts, *Solar Energy*, **157**, 244-250 (2017).
- 10) Srikanth Madala, Robert F. Boehm, A review of nonimaging solar concentrators for stationary and passive tracking applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **71**, 309-322 (2017).
- 11) Roland Winston, Juan C. Miñano, Pablo Benitez, *Nonimaging Optics*, 467-470, (2005), Elsevier Academic Press, London.
- 12) Meng Tian, Yuehong Su, Hongfei Zheng, Gang Pei, Guiqiang Li, Saffa Riffat, A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**(1), 1272-1296 (2018).
- 13) Bennett Widyolar, Lun Jiang, Jonathan Ferry, Roland Winston, Non-tracking East-West XCPC solar thermal collector for 200 celsius applications, *Applied Energy*, **216**, 521-533 (2018).
- 14) Imhamed M. Saleh Ali, Tadhg S. O'Donovan, K. S. Reddy, Tapas K. Mallick, An optical analysis of a static 3-D solar concentrator, *Solar Energy*, **88**, 57-70 (2013).
- 15) Mohammed Mansoor O, Sishaj P Simon, Kevin Ark Kumar, Kinattungal Sundareswaran, P Srinivasa Rao Nayak, Narayana Prasad Padhy, Impact and economic assessment on solar PV mirroring system - A feasibility report, *Energy Conversion and Management*, **203**, 112222 (2020).
- 16) Naveen Kumar, Tilak Chavda, H. N. Mistry, A truncated pyramid non-tracking type multipurpose domestic solar cooker/hot water system, *Applied Energy*, **87**(2), 471-477 (2010).
- 17) Ralf Leutz, Akio Suzuki, Atsushi Akisawa, Takao Kashiwagi, Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators, *Solar energy*, **65**, 379-387 (1999).
- 18) Hsin-Ping Wang, An-Cheng Li, Tzu-Yin Lin, Jr-Hau He, Concurrent improvement in optical and electrical characteristics by using inverted pyramidal array structures toward efficient Si heterojunction solar cells, *Nano Energy*, **23**, 1-6 (2016).
- 19) Carl Edward Rasmussen, Christopher K. I. Williams, *Gaussian Processes for Machine Learning*, (2006), 16, MIT Press. Cambridge.