

非追尾型集光太陽電池モジュール用 三次元レンズに関する研究

A Study on a Three-dimensional Lens for Non-Tracking
Concentrator Photovoltaic Modules

吉 岡 一 也 遠 藤 清 志 鈴 木 研 夫
Kazuya YOSHIOKA Kiyoshi ENDOH Akio SUZUKI

大 江 信 之 齊 藤 忠
Nobuyuki OHE Tadashi SAITOH

Abstract

A new three-dimensional lens for non-tracking PV modules was devised using the design concept of a non-tracking, two-dimensional lens developed by the authors. The three-dimensional lens with half-acceptance incidence angles of 30 and 45° in north-south and east-west directions was designed and fabricated. Concentrator cells were fabricated by attaching the lens to a Si solar cell. Output from the concentrator cells measured under solar simulator was almost equal to the simulated one. The optical properties of the three-dimensional lens were also investigated as a function of half-acceptance incidence angles from yearly integration of the output using a meteorological database of HASP. As a result, it was found that a three-dimensional lens designed at half acceptance angles of 30 and 70° was excellent in optical efficiency and the occupation area of the solar cell in the concentrator module can be reduced to 40% as compared to the conventional flat-plate modules.

Key words: three-dimensional lens, half-acceptance angle, non-tracking concentrator modules, optical efficiency

1. はじめに

太陽光発電の研究開発は通産省工業技術院のサンシャイン計画（1993年よりニューサンシャイン計画）の1プロジェクトとして1974年以来実施され、今日までの間、数々の研究成果がもたらされた^{(1)~(3)}。その結果、現在の太陽光発電コストはサンシャイン計画開始当初の数十分の一まで下がり、離島、山間部などにおいてはすでに太陽光発電が実用化されるに至った。また、1994年より資源エネルギー庁の住宅用太陽光発電システムの普及促進事業として住宅用太陽光発電システムに対する補助金制度が発足した。今後、一般住宅、一般事業所等々からの需要をさらに拡大してゆくには発電コストを現商用電力とほぼ同じ水準にまで引き下げる必要がある。

太陽光発電システムは主に太陽電池と周辺装置からなるが、コストダウンのためには如何にして高効率かつ低コストな太陽電池を製造するかが鍵となってい

る。これまで、太陽光発電の分野では太陽電池の高効率化のための研究開発が中心となっていたが、ここ数年太陽電池のコストは飽和傾向にあり、大幅なコストダウンの決定的な解決策が見つからない状態である。そこで、著者らはコストダウンの解決策として、集光用の光学デバイスを太陽電池モジュールへ適用する考え方について着目した。この方法を用いることで高価な太陽電池がモジュールに占める割合を従来のモジュールに対して数分の一程度に抑え、結果的にモジュール全体のコストダウンが可能となるという考えである。

集光用の光学デバイスは、太陽電池が現在の数十倍の価格であった時代より研究されてきた^{(4), (5)}。それは主として欧米などで行なわれた高倍率追尾方式の集光器である。追尾方式の集光器は太陽を高い精度で追尾せねばならず、したがって、追尾装置が必要な分だけ発電システムの構成に要するスペースはより広大なものとなる。世界的に見て、年間の全天日射量に占める直達光の割合が高い地域では追尾方式は理にかなった方式といえよう。しかしながら、日本では年間の全天日射量に占める直達光の割合は追尾方式を用い

* 原稿受付 平成7年2月25日

*1 東京農工大学工学部電子情報工学科
〒184 東京都小金井市中町2-24-16

るにはあまりに低い。また、日本では一般住宅向け太陽光発電システムの普及促進の計画があるため⁽⁶⁾、追尾を必要としない集光デバイスの開発が求められている。追尾を必要としない既存の集光光学系としては複合放物面鏡集光器(CPC)^{(7)・(8)}があるが、幾何学的に高さが大きくなるという問題があり、また、反射面の曲率半径の大きな部分が多いため、製作上の誤差を生ずる可能性もある。

そこで、著者らはこのような背景から、まず、非追尾型太陽電池モジュール用の二次元レンズを考案し、これを太陽電池モジュールへ適用することによってコストダウンを図ろうと考えてきた^{(9)~(12)}。しかしながら、このレンズは集光倍率が1.7倍と低く、実用上大幅なコストダウンが難しいものと考えられる。そこで、さらに、先に考案した二次元レンズの考え方を三次元レンズに適用し、新たな非追尾型太陽電池用三次元レンズを考案した。まず、この三次元レンズの特性シミュレーションを行い、その結果に基づいてレンズの試作およびその光学特性の評価を行い、これまでの二次元レンズとの比較を行なった。また、年間気象データを用いこの三次元レンズの許容入射半角と光学特性との関係についても調べた。

2. 三次元集光レンズの設計概念

著者らが、これまで研究を行ってきた二次元レンズは、そのレンズ断面の曲線が2つの対称な楕円を組み合わせた形状となっている。この楕円の形状はCPCなど非結像集光器の設計手法である光路長一定の原理を用い、許容入射半角及び集光部の幅を初期値として設計されたものである⁽⁸⁾。

今回考案した三次元レンズは、この二次元レンズの設計から得られた断面を用いて設計された。レンズを三次元化する方法としては、レンズ断面の中心軸のまわりに回転して得られる方法が最も単純で良好な特性が期待できる。しかし、この形状では受光部

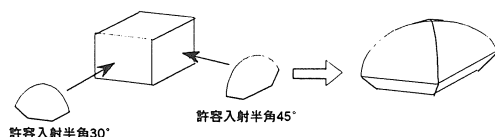


図1 三次元レンズの設計および外観図

及び集光部(太陽電池)が円になってしまい、太陽の方位及び高度の変化に十分に適応できず、すなわち、東西方向、南北方向にそれぞれ異なった許容入射半角を見込んだ集光器を設計することができない。また、モジュールを作製する際に隙間ができてしまう。そこで、受光部および集光部を四角形のまま三次元化する方法として図1に示すように、ある

立方体に対して縦と横から二次元レンズの断面で削り取る方法を採用した。

本研究においては、最初の試みとして、①冬至と夏至の各南中時の高度が春秋分時のそれに対して $\pm 23.5^\circ$ であること、②南中時を中心に ± 3 時間程度の集光、の二点を考慮し、南北方向の許容入射半角を $\pm 30^\circ$ 、東西方向の許容入射半角を $\pm 45^\circ$ とした三次元レンズを設計した。

3. 三次元レンズの特性シミュレーション

レイトレーシング法^{(7)・(8)}を用いて、レンズに対してある入射角度を持った光線群がレンズ内でどのような軌跡をたどるかを調べた。基本的にはレンズに十分な密度の光線が入射することを想定のもとで、反射の法則とスネルの屈折法則を用いることで調べる事ができる。尚、レンズ材料としてはアクリル(屈折率1.48)を仮定している。まず、レンズに対して垂直入射時の光の振る舞いについて調べた結果を図2に示す。この図ではレンズの外に出ていく光については描画されていない。点線①で切られる断面では、集光部の幅より

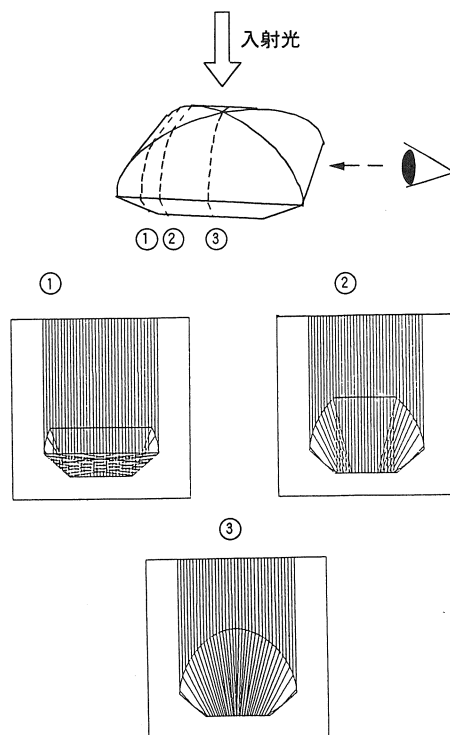


図2 垂直入射の場合の三次元レンズ内の光の軌跡

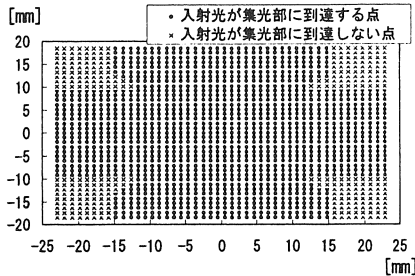


図3 三次元レンズに垂直入射した光が集光部に到達する領域

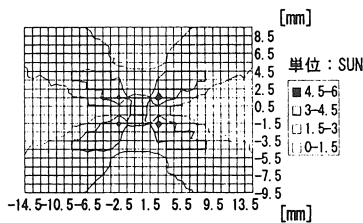


図4 垂直入射の場合の三次元レンズ集光部の光強度分布図

外側の領域に入射した光はレンズの側面から若干外に漏れてしまっている。また、点線②、③で切られる断面に入射する光については全て集光部に到達していることが確認できる。そこで、レンズに対して光が垂直に入射した場合、レンズ表面のどの位置から入射する光が集光部まで到達するかを調べた結果を図3に示す。図中の●印が垂直入射の光がレンズを通して集光部に達する領域で、×印で示された領域がレンズの外側に漏れてしまっている領域である。図よりレンズの四隅付近に入射した光は集光部まで到達していないことが分かる。原因は、このレンズが、二次元レンズの断面を異なる二つの方向から組み合わせていることにより、四隅に入射した光線はもう一方の設計角度で設計された領域の下部の斜めにカットされた面に入射し、そこで上向きに反射してしまうためである。また、水平面に1 SUNの光が照射されることを仮定して、集光部での光強度分布を計算した。レンズに対し垂直に光が入射したとき、図4のように集光部の対角線上に強く集光され、中心部が4.5～6SUNの最も高い光強度を持つことが分かった。

同様に、許容入射半角 30° で設計された方向に 30° 傾けた光が入射したときの光の軌跡を調べた。図5の①での数本の光線の振る舞いが奇異に見えるかもしれないが、この断面図の平らな部分から入射した光はレンズ下部の斜めにカットされた部分による反射を受け集光部に到達し、また、両側の曲線部分から入射した光線は、レンズ下部

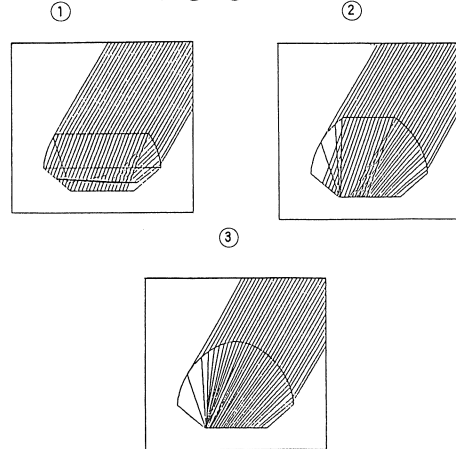
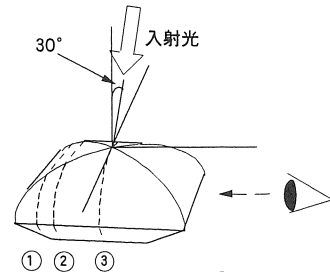


図5 許容入射半角 30° 方向へ 30° の傾きを持つ光が入射する場合の三次元レンズ内における光の軌跡

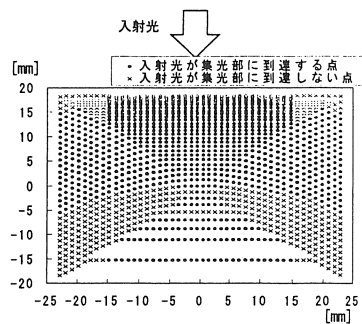


図6 三次元レンズに許容入射半角 30° 方向へ 30° の傾きを持つ入射光が集光部に到達する領域

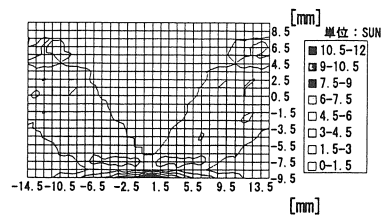


図7 許容入射半角 30° 方向へ 30° の傾きを持つ入射光に対する三次元レンズ集光部での光強度分布図

のカットされた面からの全反射を受け、外に漏れるのである。次に垂直入射の場合と同様にレンズ表面に入射した光に対し集光部まで到達する領域を図6に示す。レンズに対し垂直に入射したときに光が漏れていた領域の一部が、逆に集光部まで到達している。また、集光部での光強度の分布は図7に示すようになり、最も強い領域で10.5～12 SUNの光強度となっている。

このレイトレーシングを用いたシミュレーションにより、三次元レンズの表面に入射した光のうち集光部に到達しない箇所を明らかにすることができた。同時に、レンズに入射する光線の総数の

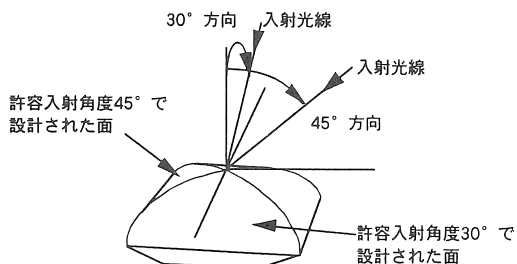


図8 シミュレーションを行なう2つの方向

うちレンズ集光部に到達する光線の数の割合として、入射光の到達率が得られた。図8に示すようなレンズに対し垂直方向から許容入射半角30°で設計された方向と45°で設計された方向の2方向に入射角度を変えていったときの入射光の到達率を計算した。図9にその結果を示す。どちらも許容入射半角までは緩やかに下がり、それを越えるとやや大きく下がっていることが分かる。また、レンズに対し垂直に入射した場合でも、約18%の光の漏れがあることが分かった。ここでは示していないが、二次元レンズの場合はその許容入射半角内では、ほとんどの入射光が集光部まで到達し、許容入射半角外では光の到達率は著しく減少する。

レンズを三次元化するにあたっては光の到達率

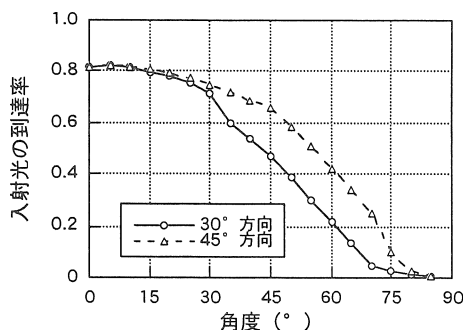


図9 入射光の到達率に対する光入射角度依存性

を100%とすることはほぼ無理で、最も良好な集光比を得られるとされる前述の回転体レンズでさえ、集光部に内接する正方形のセルを用いた場合、集光部の約37%はむだになってしまうし、仮に丸型のセルを用いることが可能だとしても、レンズの受光部が円形となってしまうことからやはりモジュールの表面全体を有効に集光器の受光部として利用することはできない。

4. 三次元レンズ付太陽電池の光学特性

三次元集光レンズを実際の太陽電池モジュールへ適用した場合を想定して、その光学特性をシミュレーション及び試作モデルを使った実験により明らかにした。

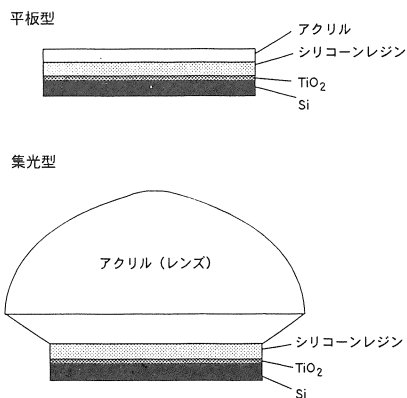


図10 平板型と集光型の計算モデル

図10に示すように、太陽電池に三次元レンズをシリコンレジン（屈折率1.42）を用いて貼り付けたものを集光型、太陽電池に2mmの平板アクリルを貼り付けたものを平板型とした計算モデルを仮定する。両者とも太陽電池は単結晶Si（屈折率3.5）であり、反射防止膜としてTiO₂（屈折率2.30）が施されている。また、変換効率は16%、セルの寸法は同一であるものとする。尚、太陽電池表面はテクスチャー構造若しくはV溝構造などの加工を施してあるのが普通であるが、太陽電池表面に入射した光は非常に複雑な振る舞いをすることから、簡単のためこのシミュレーションでは太陽電池表面はフラットであると仮定した。実際の試作モデルは太陽電池の表面がテクスチャー構造になっているものを用いたため、この点がシミュレーションモデルと大きく異なる点である。

このシミュレーションでは平板型と集光型のそれぞれの太陽電池に吸収される光エネルギーの比を光学的集光比とした。光学的集光比を計算す

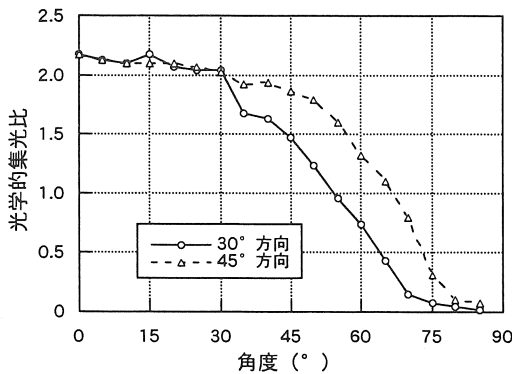


図 11 光学的集光比の入射角度依存性

る場合に一番問題になるのが異なる媒質界面での反射による光学的損失で、それについては光の反射と屈折に関するフレネルの式によって計算した。その入射角度依存性のシミュレーション結果を図11に示した。この図から、許容入射半角内では約2倍以上の光学的集光比を維持し、許容入射半角を越えると緩やかに下がっていることが分かる。さらに、集光器に入射する日射量のうち太陽電池に吸収される割合として定義された光学的効率の入射角度依存性について、図12に示した。

光学的効率は光学的集光比と幾何学的集光比の比として計算することができ、光学的効率が良いほどレンズに取り込まれた光エネルギーを太陽電池が有効に吸収しているということになる。本レンズは太陽電池とレンズの間の境界面によるフレネルの光学的損失とレンズ外への光の漏れとが光学的効率に影響を与えている。垂直入射時はフレネルの光学的損失が約12%（二次元レンズの場合と同じ）で、光の到達率が88%のため、光学的効率は78%となった。フレネルの光学的損失は理論

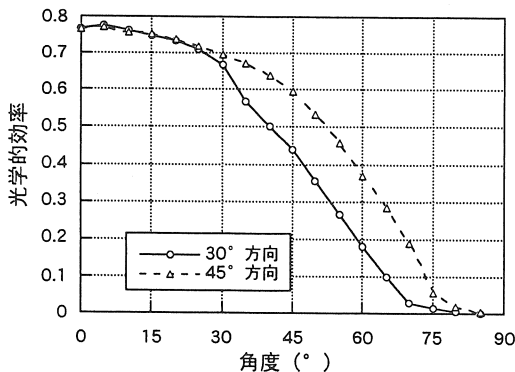


図 12 光学的効率の入射角度依存性

的にはこの計算モデルの場合、光入射角度が60°までは12~15%パーセントの範囲内にあるので、図12に示された光学的効率の特性は光の到達率の傾向に影響されていることが分かる。

次に、実際に許容入射半角30°と45°を組み合わせた三次元集光レンズ、また過去に著者らによって研究された許容入射半角30°の二次元集光レンズ^{(9)~(12)}および平板アクリル型を製作し、ソーラーシミュレータの下で測定した。ここでは、短絡電流が入射光子の個数に比例することから平板型の集光型に対する短絡電流の比を

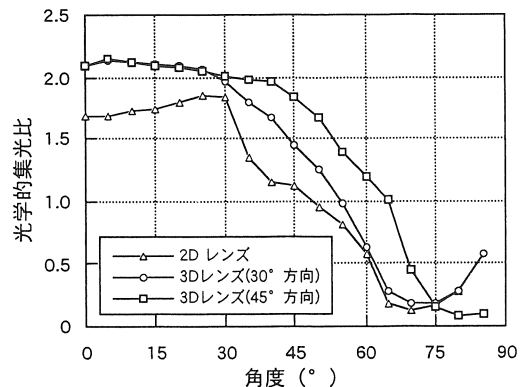


図 13 光学的集光比の入射角度依存性

光学的集光比とした。その入射角度依存性を図13に示す。この図より、二次元集光レンズは垂直入射で、光学的集光比が1.65となり許容入射半角までわずかな上昇を続け、それを越えると急激に光学的集光比が下がる。この傾向は従来のCPCなどに代表される光路長一定の原理で設計された二次元集光器とほぼ同じである^{(4)~(5)}。一方、三次元レンズは垂直入射で2.1の光学的集光比を持ち許容入射半角を越えると緩やかに下がっていくことがわかる。このことから、この三次元レンズは二次元レンズよりも多くの散乱光を取り込めることが期待できる。一方、曲線因子(FF)については、平板型に比べ、若干集光型の方が悪くなる傾向があらわれたが、これは集光することにより、局部的に光強度が強い箇所と弱い箇所が生じてしまうためであると推定できる。セル表面上での集光分布の不均一性がセル特性へ与える影響については今後の研究の中で詳しく調べてゆき、最適設計の指針としたい。

また、この実験結果と図11で示したシミュレーション結果とを比較すると、光の入射角度が大きくなるとややばらつきがみられるもののほぼ一致していることが分かる。入射角度が大きいときの実験値と計算値との違いは、シミュレーションの

際、レンズ上部の受光面にのみ光が照射されていると仮定したのに対し、実際の実験では入射角度が大きいところでレンズ下部の側面から光が入射した可能性が考えられる。

実験モデルと計算モデルとでは太陽電池の表面がテクスチャーとなっているか否かの違いがあったが、いずれもそれぞれのモデル内での集光型と平板型のあるデータの比として光学的集光比を算出したために違いが表われなかったものと考えられる。

5. 三次元レンズの許容入射半角に関する考察

非追尾型太陽電池モジュールへの応用を想定し、本レンズの許容入射半角と年間に収集される日射量との関係について調べた。このシミュレーションにあたってまず、設計許容入射半角を変えたレンズのそれぞれの光学特性を調べた。季節の太陽の変化を考えたものが南北方向の設計角度で、1日の太陽の変化を考えたものが東西方向の設計角度に相当する。南北方向の設計角度は 15°

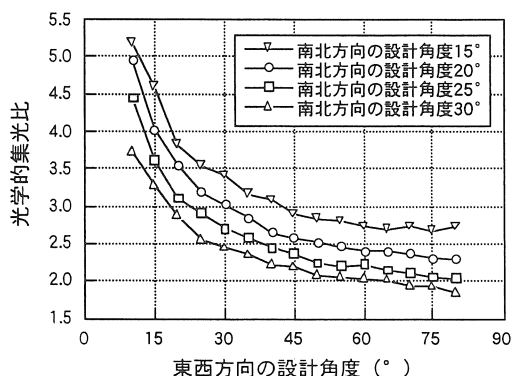


図14 東西および南北方向の設計角度による光学的集光比の変化

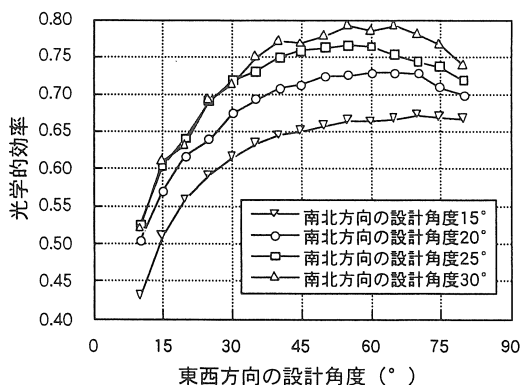


図15 東西および南北方向の設計角度による光学的効率の変化

から 30° まで 5° 刻みで4種類、東西方向の設計角度は $10^\circ \sim 80^\circ$ まで 5° 刻みで15種類、即ち60種類のレンズについて計算を行なった。レンズに対して、光が垂直入射した時のそれぞれのレンズの光学的集光比を図14に示す。この図から南北方向、東西方向共に設計角度が小さいものが光学的集光比は大きくなることが分かる。また、光学的効率を図15に示す。図3に示したように、レンズに対して真上から光が入射する場合、レンズの四隅に入射した光はレンズの外に漏れてしまう。設計角度が小さくなると幾何学的集光比が大きくなることから、この四隅の面積は設計角度が小さくなると大きくなる傾向がある。よって、図15では設計角度が小さいものほど到達率が悪くなるので、光学的効率は低い値を示している。

以上より得られた光学特性を用いて、三次元レンズの許容入射半角を変えることでどの程度までの日射量を取り込むことが可能なのか、年間の日射量データを用いて調べた。標準気象データとして、空気調和・衛生工学会で開発された動的空調負荷プログラム用の毎時気象データであるHASP (Heating Air-Conditioning and Sanitary Program) データを用いた。HASPデータは、法線面直達日射量、水平面天空日射量、気温、風向、風速等々の各項目が1時間毎のデータとして1年分収録されている。また、これらのデータはすべて過去10年間の観測値の平均値とされているため地域の平均的な気候の特色を反映している。今回の計算では東京における1960～1969年を統計期間としたHASPデータを用いて計算した。

計算モデルとしては、前節にて述べた平板型、集光型のモデルをそのまま使い、双方を東京における秋春分時の南中時の太陽の方向に向けて設置することとする。集光型の直達日射量成分は、HASPデータが示す個々の日時（すなわち高度と方位角）に対応する光学的集光比と直達日射量成分との積を計算することで得られる。また、散乱光については天空上のあらゆる方角を等輝度散乱面と仮定しこれらの微小領域から直達光があたかもくるかのように想定し、個々の微小領域の方角（すなわちそれから得られる光入射角度）に対応する光学的集光比と日射量とを天空上で積分を行うことで計算した。尚、天空上からの散乱光のうち、集光型、平板型を設置した傾斜面の背後からのものは遮られるのでそれは除外した。

まず、東京を想定した平板型モデルの太陽電池に吸収されるであろう月毎の平均日射量の変化を計算した結果を図16に示す。この図より、通常は散乱日射量より直達日射量のほうが大きい、6月は散乱日射量が多いことが分かる。また、全

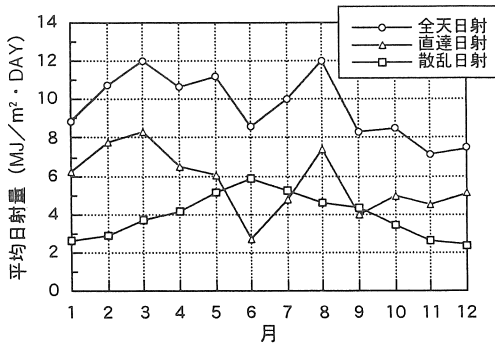


図16 平板型の単位受光面積あたりの日射量の変化

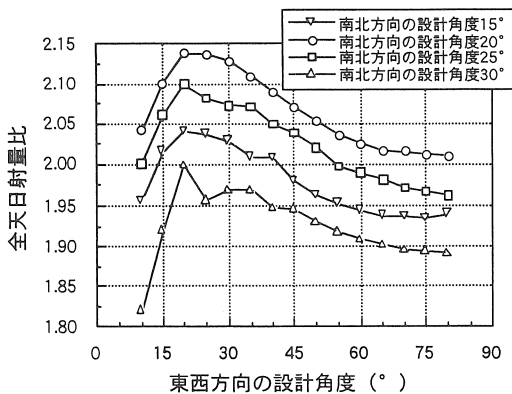


図17 単位集光面積あたりの全天日射量比の設計角度依存性

天日射量では3月と8月が高い値を示している。

同様にHASPデータを用いて、三次元レンズの集光部に到達しSi太陽電池に吸収されるであろう年間の全天日射量を計算した。平板型の全天日射量と各角度で設計されたレンズの単位集光面積あたりの全天日射量比の関係を図17に示す。この図から、平板型に対する単位集光面積あたりの全天日射量比が最も高いものは、南北方向20° 東西方向20° で設計されたレンズであり、その値は2.14であった。

次に、平板型の全天日射量と各角度で設計されたレンズの単位受光面積あたりの全天日射量との比を図18に示す。この図では、単位集光面積あたりでは最も高い値を示した南北方向20° 東西方向20° で設計されたレンズは0.56と低い値を示しており、明らかに損失が大きいことを示している。これに対し、図18において、平板型に対する単位受光面積あたりの全天日射量比が最も高いレンズは、南北方向30° 東西方向70° で設計されたレンズで、その値は0.82であった。

集光器というのは反射や屈折を用いることで集光部へより多くの光を導くことを前提として設

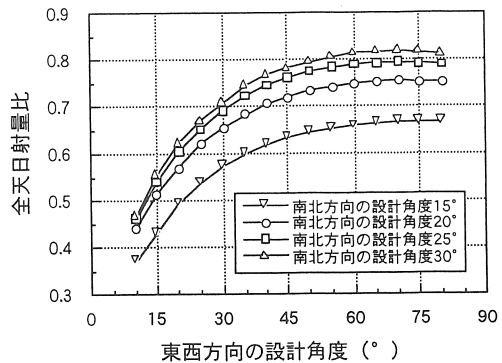


図18 単位受光面積あたりの全天日射量比の設計角度依存性

計されるため、垂直入射時においても集光部に到達するまでに若干の光学的損失が起こる。具体的には、受光部の表面形状から起こる光の反射損失および集光部に到達する際、若干の光について集光面に対する入射角度が付きすぎることによる光学的損失である。しかしながら、集光器を太陽電池モジュールに利用するねらいはモジュール内の太陽電池占有面積の低減による低コスト化であるため、図17から得られたピーク値0.82は集光器の観点からすれば許容される値といえよう。

以上で述べられたことを基に、平板型と受光面積の等しい上記の二つの三次元レンズと著者らの過去の研究の中で最も光学特性のすぐれていた許容入射半角25°の二次元レンズ⁽¹³⁾を比較する目的で、平板型に対する日射量と太陽電池の占有面積の関係を図19に示した。尚、比較のためにとりあげられているこの二次元レンズは許容入射半角内でのレンズ外への光の漏れが殆どないため低コスト化への観点から最も単位集光部あたりの日射量が期待できるものである。この図から、南

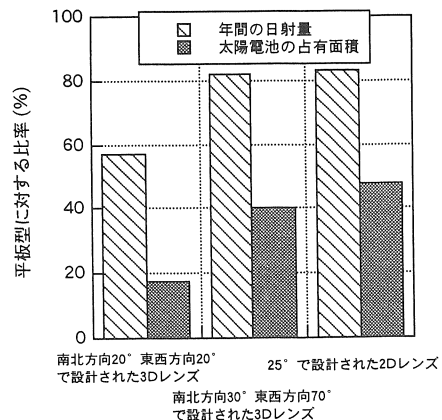


図19 平板型と受光面積が等しいときの集光型の日射量と太陽電池の占有面積

北方向 20° 東西方向 20° のレンズは太陽電池の占有面積は約17%と少ないが平板型に対する日射量は約57%であり、実用性を欠いている。これに対して、南北方向 30° 東西方向 70° で設計された三次元レンズは、二次元レンズとほぼ等しい日射量比を持ちながら太陽電池の占有面積は約40%となる。この値は二次元レンズの使用太陽電池の約83%である。したがって、二次元レンズを三次元化する事により、更に太陽電池の占有面積を小さくすることができる可能性が示された。

6. まとめ

本研究では、従来の二次元レンズに対しその集光倍率を上げるために三次元化に取り組みその光学特性を調べた。先ず、許容入射半角 30° と 45° の三次元レンズの光学特性をレイトレーシング法でシミュレートし2倍以上の光学的集光比が得られることを明らかにした。また、実際に三次元レンズを試作し測定した結果、シミュレーション値とほぼ一致した値を得た。

つぎに、標準気象データとしてHASPデータを用いて年間の日射量計算をし、三次元レンズの設計角度毎の光学特性を調べ検討をした。その結果、南北方向 30° 東西方向 70° のレンズは二次元レンズと等しい損失を持ちながら、太陽電池の占有面積を40%に減少する事ができ、二次元レンズより更に太陽電池の占有面積を小さくできることが裏付けられた。

<謝辞>

本研究は通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画の一環として、太陽光発電技術研究組合から委託され実施されたもので、関係各位に感謝します。また、太陽電池を御提供下さいましたシャープ(株)エネルギー変換研究所の布居徹氏、町田智弘氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) 山崎邦彦「ニューサンシャイン計画の概要」、応用物理、Vol.63、No.8、1994、p. 762-769
- (2) 林 豊、黒川浩助「太陽光発電」、応用物理、Vol.63、No.8、1994、p. 792-797
- (3) 埴岡公孝、「太陽光発電とソーラーエネルギーの普及促進策について」、太陽エネルギー、Vol.19、No.4、1993、p. 15-23
- (4) A. Luque, Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1989.
- (5) W. T. Welford, R. Winton, "High Collection Nonimaging Optics", Academic Press, San Diego, 1989.
- (6) 水上淳二、「住宅用太陽光発電システムの導入普及方策」、太陽エネルギー、Vol.20、No.5、1994、p. 9-13
- (7) A. Luque, Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1989, p.53-76.
- (8) W. T. Welford, R. Winton, "High Collection Nonimaging Op-

tics", Academic Press, San Diego, 1989, p.305-429.

(9) 小林雅明、鈴木研夫、小林繁雄「太陽電池用非結像集光系の設計とその光学特性」、平成4年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会(1992)

(10) A. Suzuki, M. Kobayashi, S. Kobayashi, K. Yoshioka and T. Saitoh, "Design and Optical features of a Non-Imaging Lens and its Application to Solar Energy Systems", the Proc. of the First International Conference on New Energy System and Conversions, Yokohama, June, 1993, p.295-299

(11) K. Yoshioka, K. Endoh, M. Kobayashi, A. Suzuki and T. Saitoh, "Design and Properties of a Refractive Static Concentrator Module", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol.34, No. 1-4, September, 1994, p. 125-131

(12) 遠藤清志、小林雅明、吉岡一也、鈴木研夫、齊藤 忠「太陽電池モジュール用複合楕円レンズの最適設計」、1994年秋季応用物理学会予稿集、p. 717 21pZC11

(13) K. Yoshioka et al., An Optimum Design and Properties of a Static Concentrator with a Non-Imaging Lens, to be published in the Proc. of 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, December, 1994.