

## 1. 研究の目的

曇天時には太陽光は雲によって散乱される。晴天時のように天球上の一点からではなく、様々な方向から地上に到達する。また、自動車のエンジンのような高温の固体表面から、熱が輻射の形で外部に放出される。その輻射(=光)は、位相・方向共にランダムな散乱光とみなせる。蛍光灯、光放出ダイオード(LED)、レーザーダイオード(LD)も、光源と同程度の空間スケールでは散乱光とみなせる。有限の大きさをもつ発光面から光源固有の強度分布の光が放出され、光線は幅広い角度方向分布を持つ。

本研究の出発点は、「ランダムな光線方向を持つ散乱光を、秩序ある状態、つまり、平行なビームに成形したり、一点に収束したりすることは可能か?」という問いである。点光源から放射状に放出される光や、レーザービームのような理想平行光は、原理的に凸レンズを用いて一点に集光できる。一方、散乱光は日常的に多くの場面に現れるにもかかわらず、これをうまく制御する方法はよくわかっていない。自動車のヘッドライト用ランプハウスのような照明具は、照明範囲や照度の一様性といった器具固有の目的に合わせて経験的に設計される。散乱光を制御するための対症療法以外の確固たる方法はないのか?我々の知る限り、過去の文献には、明確な答えは無いようである。

散乱光収束技術は、集光型太陽発電への応用が有望である。集光型には、太陽光を追尾するものが最も実用に近いと考えられているが、複雑な機構が必要で、強風対策も必要となる。追尾せずに散乱光を集める技術として有望視されているのが、色素を含む媒質にエネルギーを吸収させた後、色素からの発光を太陽電池に当てる「発光型」である。例えば、今年2月には、次のような研究が、一般向けネットニュースや NEDO海外レポート(NO.1083, 2012.3.23)で取り上げられている。以下、ネットニュースの引用:「米国カリフォルニア大学マーセド校は1月19日、同校の研究チームが、太陽電池用集光器の形状を変えると効率性が著しく向上することを発見し、実用化に一步近づいたと伝えた。同研究を率いた同校の物理学教授 Sayantani Ghosh氏は、この進歩は太陽光発電にとって重要な飛躍的進展になりうると述べた。Ghosh教授によれば、発光型集光器の商品化を妨げる主な問題は、自己吸収率が高いことだという。研究チームは、集光器の形状を中空の筒型にすることでこの問題に対処できるとした。この方が自己吸収による損失が少なく、より多くの太陽光を吸収するという。従来型の太陽電池に比べ最も優れている点は、曇りの日のような散乱光でさえ発電可能なことである。またこのため、常時太陽の方を向いていなくてもよく、追尾機構が不要だ。Ghosh教授はこの発見で、発光型集光器の商品化が実現できるかもしれないと述べた。特にこの設計は、同数の量子ドットを使用して性能を高めるので、追加コストがかからない。これはインフラコストを抑えるとともに、壁や窓などの垂直面に集光器を組み込む可能性を広げる。次のステップは、大規模配列の中空・筒型の発光型集光器を開発し、そのパネルの効率性を調査することだという。」その詳しい内容は、次の論文に示されている: R. H. Inman, G. V. Shcherbatyuk, D. Medvedko, A. Gopinathan, and S. Ghosh, "Cylindrical luminescent solar concentrators with near-infrared quantum dots," *Optics Express*, Vol. 19, Issue 24, pp. 24308-24313 (2011) 発光型では媒体による吸収が性能低下の要因として挙げられるが、これをクリアしても、今度は特殊な媒体を用いるため、集光器製造コストが過大になる可能性は大きい。単位面積当たりの集光器の製造コストは、太陽電池のそれよりも低くならなければ意味が無い。やはり、媒質に一旦吸収するというようなことはせずに、単純な材料、単純な形状の集光器で光を直接的に集める方法はないだろうか?東京農工大は、5年ほど前に特殊なレンズを使う散乱光収束方法を提案している。(関連特許番号: 2735154, 3433224)しかし、散乱光に対する性能は不明で、また、晴天時でも、集光器を用いない場合に比べて最大2倍程度の強度増加にとどまる。本

## 2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

単純形状の反射光学系を用いて散乱光を収束する方法を提案し、日米両国で特許申請を行った。現在、系統的な光線追跡シミュレーションを進め、その結果として、新たな散乱光収束方式の着想に至っている。

### (1) 円錐ミラーによる平行ビームの収束

円錐の内部が鏡面になっている場合を考える。図3(a)に概念図示されており、円錐の中心軸に平行に光線が入射したときの光線の軌跡を描く。入射光線は、円錐の鏡面で反射を繰り返しながら、頂点方向に進み、光強度を高めることが可能である。しかし、円錐の半頂角を $\alpha_c$ とすると、図に示されるように、光線が円錐の中心軸となす角度は、円錐面で反射されるたびに $2\alpha_c$ だけ増加し、最終的には、円錐面への入射角が $90^\circ$ を超えると、光線は頂点方向とは逆向きに出口に向かって進むようになる。光線収束の限界は $\alpha_c$ によって決定されており、図1に示すように、 $\alpha_c = 4^\circ$ の場合には、光の強度 $F$ は、入射光強度 $F_1$ の100倍程度まで強める事ができる。(K. Mori, and H. Katsurayama, "Laser Pulsejet with Beam Concentration by Multiple Reflections in a Sharp-Cone Nozzle," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.26, No.6, 2010.より引用)

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

収縮管型の集光器について、効率 $\eta$ と集光度集光器出口と入り口の面積比 $\varepsilon$ との関係について、図1(b)に示す。解析の結果、集光度が高く( $\varepsilon$ が小さく)なるに従い、急激に効率が低下することがわかる。低下のcriteria:  $\varepsilon_{cr}$ は、100%の効率で達成できる最大集光度を表すが、円錐の角度 $\alpha$ が大きくなるに従ってこれは低下することがわかる。図1(b)に、拡散光の角度分散 $\delta\theta$ をパラメタにとって  $\varepsilon_{cr}$  をプロットした。分散角度が大きくなると、やはり  $\varepsilon_{cr}$  の最小値(最大集光度)は上昇していく。角度分散 $\delta\theta=15\delta\varepsilon\gamma$ 程度であれば、 $\varepsilon_{cr}=0.3$ 程度まで行くので、10倍程度の集光が可能であることが示された。

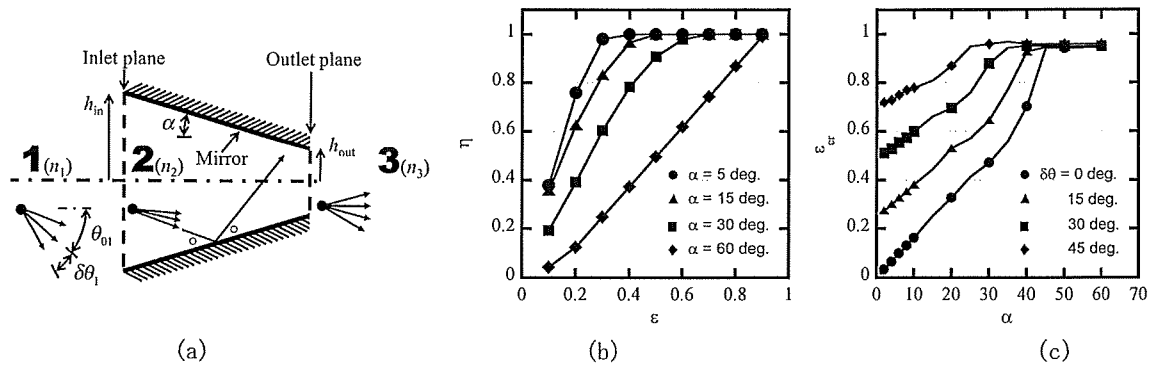


図1 収縮管の散乱光収束特性 (a) 収縮管型集光器の概念図 (b) 収束度 $\varepsilon$ と収束効率 $\eta$ との関係 ( $\delta\theta_{in} = 15\text{deg.}$ ), (c) 開口角度 $\alpha$ と限界収束度 $\varepsilon_{cr}$ との関係

(2) 実証実験

図2に  $\theta_{01}$  と光強度の関係について、実験的に調べた結果と解析結果との比較を示す。実験では、LEDを平面上に並べ、アレイ化したものを用いて拡散光を模擬した。拡散角度  $\delta\theta_1$  は  $15^\circ$  と一定に設定し、円錐形状の集光器を機械加工で製作したものを用いた。集光器内部の鏡面における光の反射率はおよそ85%程度である。解析において内部の鏡面の反射率  $\eta_{mirror}$  を85%と設定した。また、他の設計パラメタとして、 $\varepsilon = 0.3$  and  $\alpha = 10^\circ$ 。■の点が内部にガラスを挿入しない場合 ( $n_1 = n_2 = 1.0$ ) ▲の点がガラスを挿入した場合 ( $n_1 = 1.0, n_2 = 1.5$ ) である。いずれも、数倍程度の光強度の増幅が確認できている。また、先述の解析結果として、 $\eta\eta_{mirror}\varepsilon^{-2}$ の式を使ってカーブを引いたのが、Ray-tracingと書かれもので、やはり実験と良い一致を示している。

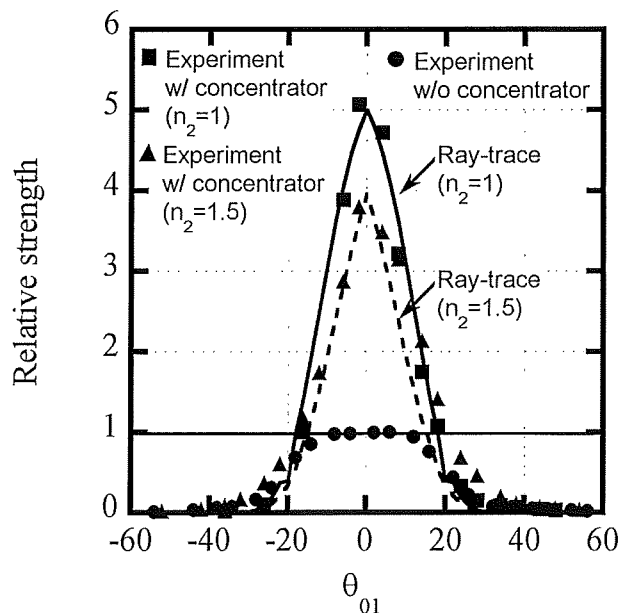


図2 実証実験と解析結果との比較

### 3. 研究の結論、今後の課題

- Raytracing解析を系統的に行うことで、集光器の設計パラメタに対して、どの程度の集光度を達成できるが理解できるようになり、集光器の設計指針を立てることができた。
  
- 実証実験を行った結果、解析の結果とよく一致し、最適化されていない設計条件の元でも、最大5倍の集光が達成された。

#### 今後の課題

- Optical Expressへの論文投稿
- 波動光学シミュレーションに基づく光波・音波制御

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

1. 社会的価値

本研究で実証した集光器は、太陽が傾いていても、曇天でも、太陽光を集光できる唯一の集光器である。これを太陽光発電設備に取り付けることで、大幅な発電コストの低減が可能である。

2. 学術的価値

本研究で実証した集光器は、拡散光の集光方法として、初めて系統的に調べられた方法である。

3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

Koichi Mori, "Characteristics of the converging-mirror type diffuse-light concentrator," Solar Energy, submitted.