

# 集光デバイス設計のための蛍光導光板の集光特性評価と シミュレーションモデルの構築

石井 克典\*<sup>1</sup> 浅川 久志\*<sup>1</sup> 若木 守明\*<sup>2</sup> 渋谷 猛久\*<sup>3</sup>

## Evaluation and Construction of a Simulation model of Fluorescent Planar Waveguide as Light Collecting Device

by

Katsunori ISHII\*<sup>1</sup>, Hisashi ASAKAWA\*<sup>1</sup>, Moriaki WAKAKI\*<sup>2</sup>, and Takehisa SHIBUYA\*<sup>3</sup>

(Received on Sep. 30, 2015 and accepted on Jan. 07, 2016)

### Abstract

Development of solar photovoltaics technology has been actively carried out typically in the field of renewable energy. The technology used to concentrate the incident solar light with a solar tracking system is the key method used to enhance collection efficiency. However, the system requires additional equipment and involves higher costs. In this study, we focused on a fluorescent planar waveguide as a candidate for a cost effective solar energy collection device. Optical characteristics of the fluorescent planar waveguide were analyzed quantitatively and simulated as optical devices in order to enable us to propose an optimum design for the system.

**Keywords:** Solar collector, Solar energy, Florescent planar waveguide, Edge glow, Optical simulation

### 1. 諸言

再生可能エネルギーを用いた発電システムは国内でもここ数年で広がりを見せてきている。代表的な再生可能エネルギーには、太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス、海洋エネルギーなどがある。その中でも太陽光発電は地域・場所の制約を比較的受けにくいこともあり特に普及が進んでいる<sup>1)</sup>。しかし国内全体のエネルギー供給量からみると、再生可能エネルギーによる供給量はまだ10%未満であり、その中の太陽光発電の割合となると2%に達していない<sup>2)</sup>。太陽光発電の普及スピードが遅い理由には、設備コストとエネルギーの安定供給の問題がある。これは再生可能エネルギー全般的に言える課題でもある。太陽から地球に達するエネルギーの収支を Fig. 1 に示す。この中から実際に利用できるエネルギーは1 m<sup>2</sup> 当たり約1 kWである<sup>3)</sup>。これを利用しやすい電気エネルギーに変換する太陽電池パネルを使用した場合、効率は約20%が最大となっている。さらに季節・時間帯・天気の影響による入射強度の変化から、太陽電池の出力は変動する<sup>4)</sup>。そのため太陽電池パネルを敷き詰めるだけでは、期待された出力を常に安定して得ることは不可能である。そこで高効率な太陽光発電設備では、光学デバイスを用いた集光システムを採用するケースがある。

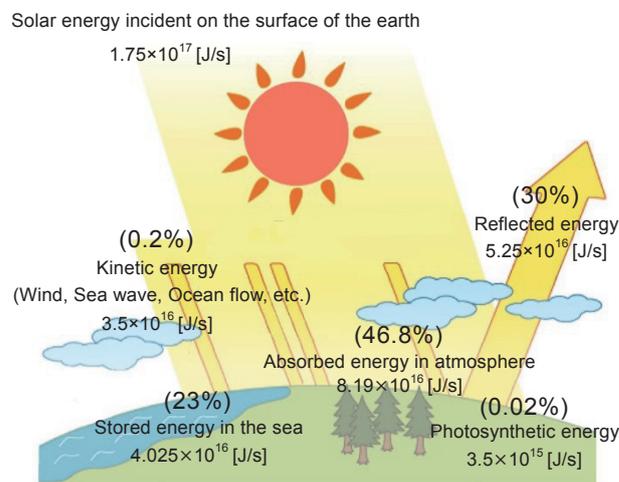


Fig. 1 Schematic diagram of solar energy flow on the earth.<sup>3)</sup>

集光効率を上げることで太陽電池パネルの性能を最大限に利用し、より大きな電力を効率的に取り出すことが可能となる<sup>5)</sup>。しかし、このような光学デバイスを併用する場合、太陽と光学デバイスは常に同一軸上に配置する必要がある。このため、Fig. 2 に示すように、太陽への追尾システムも合わせて導入することが必要となる。追尾システムを付加した光学デバイスを導入することで先に述べた環境条件による出力変動の問題も大幅に改善

\*1 丸茂電機株式会社技師

\*2 工学部光・画像工学科名誉教授

\*3 工学部光・画像工学科教授

することが可能となるが、これらの設備の設置においては初期導入コストや維持管理コストの問題が発生する。

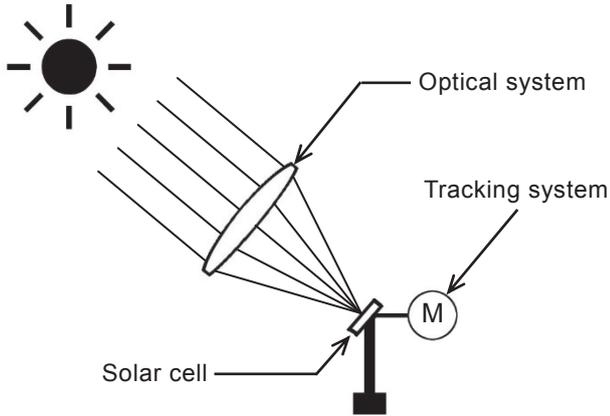


Fig. 2 Schematic diagram of solar tracking system for solar cell panel illumination system.

我々は太陽光発電において、低コストで入射光強度を確保したうえで入射角度依存の少ない集光デバイスを検討し、蛍光導光板を用いた特徴的な集光方法に着目した。蛍光導光板を用いた集光系は以前から研究されており、太陽光発電設備における太陽電池パネル面積の削減や効率の向上を目的として、蛍光体の組成、濃度、粒子径に関する報告や特許の出願<sup>6-8)</sup>もあったが、Si 結晶系太陽電池パネルの価格が下落していったことで注目を浴びなかった<sup>9)</sup>。しかし近年、化合物系太陽電池の開発や、特定波長域での光の利用用途が広がったことで、今後再び注目を浴びると考えられる。

本研究では蛍光導光板の蛍光放射強度に対する形状依存特性の評価実験を通して、蛍光導光板の集光デバイスとしての特徴を定量的に評価することを目的とした。また、シミュレーションモデルを構築し、そのモデルによるシミュレーション結果と、実際の加工モデルの測定結果との比較を行うことにより、蛍光導光板を集光デバイスとして扱う光学系でのシミュレーション設計の有用性を示すとともに、蛍光導光板の光学的な特徴を明らかにした。

## 2. 集光原理

蛍光導光板の集光原理を Fig. 3 に示す。蛍光導光板の上面に入射した光は蛍光体によって吸収率  $\eta_{abs}$  で吸収される。蛍光体に吸収された光はストークスシフトによって長波長の光に  $\eta_{stok}$  の効率で緩和され、蛍光として効率  $\eta_{qua}$  で放射をする。放射光のうち、媒質と空気の臨界角を超えた光が蛍光導光板の上下面間で全反射を繰り返しながら端面へと光を導くことで  $\eta_{trap}$  の効率で出射端面に集光される。放射光は、伝播中に  $\eta_{dye}$  の割合で蛍光体によって再吸収・散乱および  $\eta_{mat}$  の割合で媒質に吸収され、エネルギーの減衰を伴い出射端面から放射される。蛍光導光板に入射するエネルギーを  $Q_a$ 、蛍光導光板上面での

エネルギー反射率を  $R$ 、出射端面から放射されるエネルギーの総和を  $Q_r$  とすると、蛍光導光板による集光効率  $\eta_{opt}$  は以下の式で与えられる<sup>7,8)</sup>。

$$\eta_{opt} = \frac{Q_r}{Q_a}$$

$$= (1 - R) \cdot \eta_{abs} \cdot \eta_{stok} \cdot \eta_{qua} \cdot \eta_{trap} \cdot \eta_{dye} \cdot \eta_{mat}$$

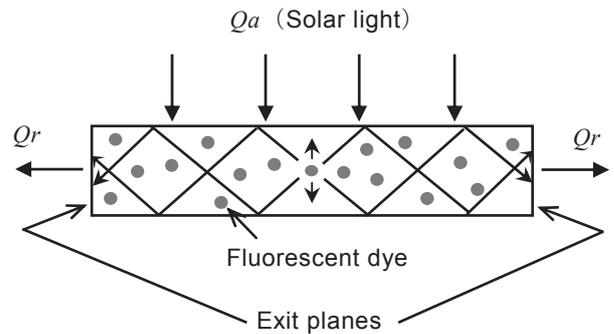


Fig. 3 Optical principle of light collection in the fluorescent planar waveguide.

## 3. 蛍光導光板の変換効率評価実験

蛍光導光板の集光効率を評価する実験系を Fig. 4 に示す。蛍光導光板の広い面に入射光を照射し、蛍光導光板の端面中央から出射される蛍光を積分球 (SPH-8 : Labsphere) に入射した。積分球内で散乱され空間強度分布が均一になった蛍光を光ファイバーで取り出し、分光器 (USB2000 : Ocean Optics) により分光測定を行った。測定された相対強度に校正を施し、放射強度 ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) を導出した。矩形蛍光導光板の面積、厚さ等の異なる各種蛍光導光板からの蛍光を測定し、絶対放射強度スペクトルを求めた。

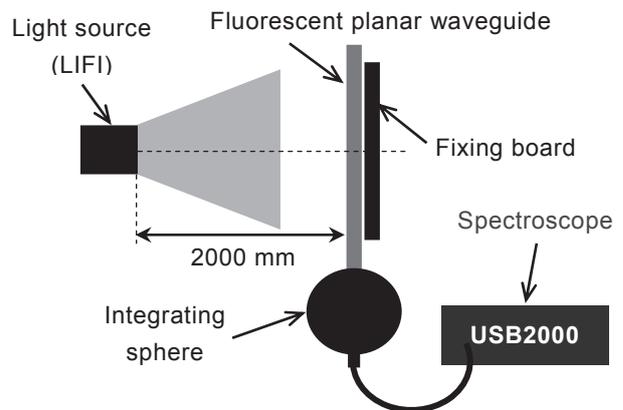


Fig. 4 Schematic diagram of optical measurement for the conversion efficiency of the fluorescent planar waveguide.

蛍光導光板には、太陽光発電での使用を想定し化合物系太陽電池の光電変換効率が最高となる 660 nm 付近に変換波長のピークがある蛍光板 (#6980 : カナセ工業) を使用した (Fig.5)。

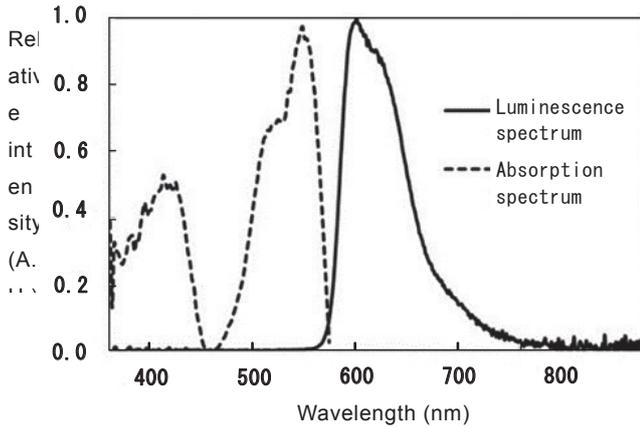


Fig. 5 Absorption and fluorescence spectra of the fluorescent planar waveguide.

入射光源は、Fig. 6 に示すプラズマ光源（LUXIM：LIFI-ENT-31-02 色温度 5300K）を使用した。プラズマ光源は電極を持たないことで、長期に渡り安定した発光をする。石英カプセル内の封入物を高周波でプラズマ化し Fig. 7 に示す太陽光に近い発光スペクトルを有する高輝度の光源である<sup>11)</sup>。

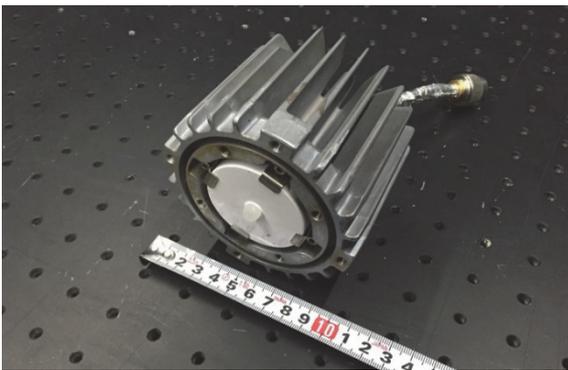


Fig. 6 External appearance of light source with color temperature of 5300K (LUXIM LIFI-ENT-31-02).

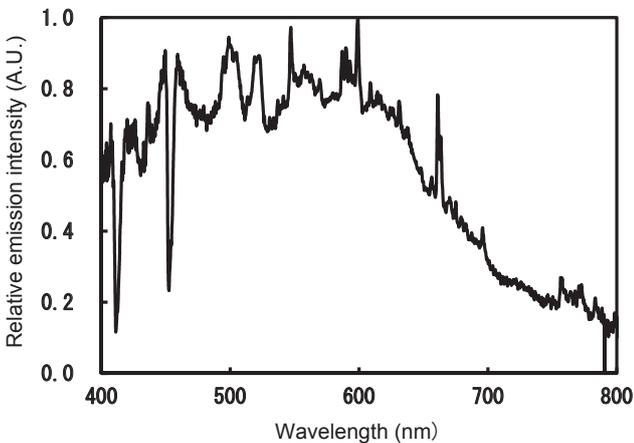


Fig. 7 Emission Spectrum of light source with color temperature of 5300K (LUXIM LIFI-ENT-31-02).

#### 4. 蛍光導光板の変換効率評価結果

蛍光導光板の集光効率を相対的に評価するために、蛍光放射強度の形状依存性を評価した。使用した蛍光導光板の変換波長のピークである 660 nm における入射光の入射強度  $I_{660}$  と、 $I_{660}$  に対する蛍光放射強度  $I_{F660}$  の比を増大係数  $A$  ( $A = I_{F660} / I_{660}$ ) として定義した。増大係数  $A$  を用いて蛍光波長領域に限定した集光効率を示すことで、蛍光変換によって集光する蛍光導光板の特徴を相対的に評価した。

##### 4.1 蛍光導光板面積依存特性評価

板厚が 5 mm で蛍光導光板の一辺の長さを 100 mm ~ 1000 mm (面積 0.01 m<sup>2</sup> ~ 1.0 m<sup>2</sup>) で変化させた場合の入射光及び各蛍光導光板からの蛍光放射強度スペクトルを Fig. 8 に示す。

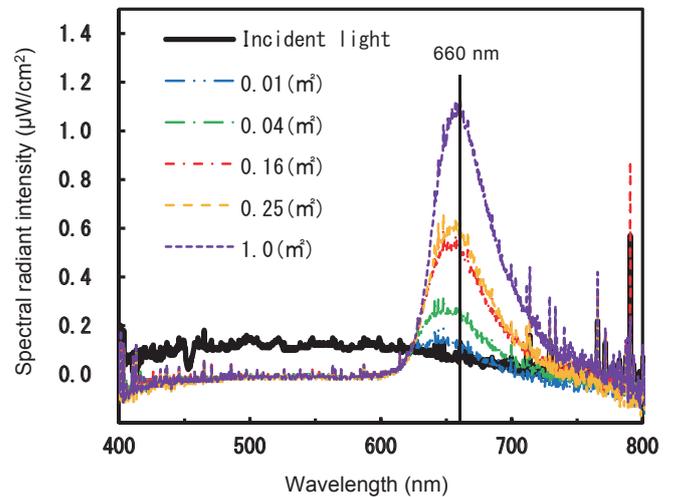


Fig. 8 Incident light spectrum and emission spectra from the fluorescent planar waveguides with different areas.

入射光によって励起された各蛍光導光板の蛍光スペクトルは、ピークが 660 nm で FWHM が約 50 nm であった。すべてのサイズの蛍光導光板において、蛍光の波長帯域では入射光より蛍光の放射強度が上回り、蛍光導光板サイズが大きくなるにつれて蛍光放射強度も増加した。このことから、入射光エネルギーが蛍光導光板の面積に応じて蛍光波長領域に集められていることがわかる。

面積の違いによる増大係数  $A$  としてプロットした結果を Fig. 9 に示す。一辺の長さが 100 mm である 0.01 m<sup>2</sup> の蛍光導光板で  $A$  の値は 1.7 倍、一辺 1000 mm である 1 m<sup>2</sup> の蛍光導光板を用いる事で 15 倍の集光効率を得られたことがわかる。面積 0.16 m<sup>2</sup> 以上で  $A$  の値は飽和傾向を示すが、これは面積増加に伴い蛍光導光板への入射光量の増加とともに、散乱や蛍光板外への放射、吸収も増えるためであると考えられる。

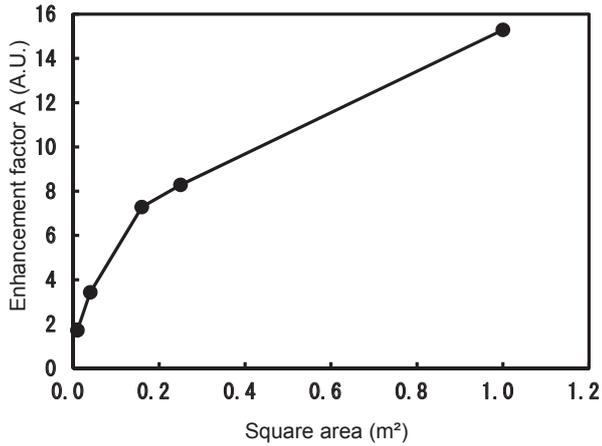


Fig. 9 Area dependence of enhancement factor A of the fluorescent planar waveguide.

#### 4.2 蛍光導光板厚さ依存特性評価

正方形の一辺の長さが 300 mm である蛍光導光板の板厚を 2 mm~10 mm で変化させた場合の増大係数 A の値を Fig. 10 に示す。増大係数 A は板厚の増加とともに減少した。これは板厚が増すに従って蛍光体に吸収される入射光の割合は増加するが、蛍光体による放射光が出射端面に達するまでの光路長が長くなることで、再吸収及び散乱による伝播損失が大きくなるためであると考えられる。

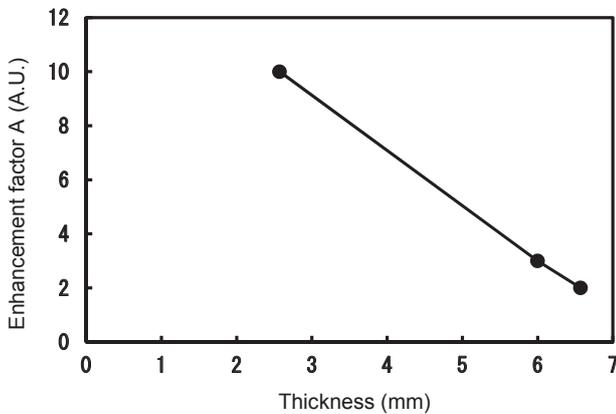


Fig. 10 Thickness dependence of enhancement factor A of the fluorescent planar waveguide.

#### 4.3 蛍光導光板の縦横比依存特性評価

板厚が 5 mm で 0.09 m<sup>2</sup> の面積を有する 2 種類の蛍光導光板において、それぞれ縦横を入れ換え出射端面を変えることで、縦横比に対する増大係数 A の値を測定した。Fig. 11 に示すように、測定する出射端面の一辺の長さを a, 縦横比を (b/a) としたときの増大係数 A を Fig. 12 に示す。縦横比が増加するにしたがって出射端面における増大係数 A は増加した。蛍光体粒子から放射される光の振る舞いを Fig. 13 に示す。放射光のうち、光線 A に示すような出射端面以外の面に臨界角以下で入射する光は、

その面から出射し、出射端面において有効に使用することはできない。出射端面以外の面で全反射をする光線のうち、光線 B は出射端面で全反射をするが、それ以外の光線 C は出射端面から有効な光として取り出せる。出射端面からの奥行長 b が長いほど、出射端面からみた、有効な光線をもつ蛍光体粒子の数が増える。このことから、(b/a) の増加とともに増大係数 A が増加したと考えられる。

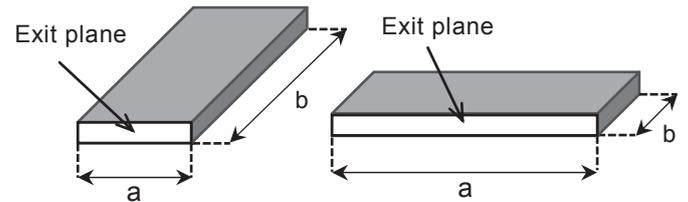


Fig. 11 Schematic diagram showing the geometry of the rectangular fluorescent planar waveguide with sides a and b.

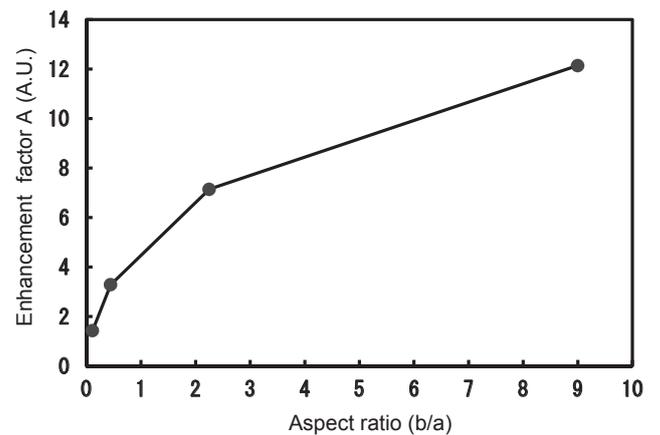


Fig. 12 Aspect ratio (b/a) dependence of enhancement factor A of the fluorescent planar waveguide.

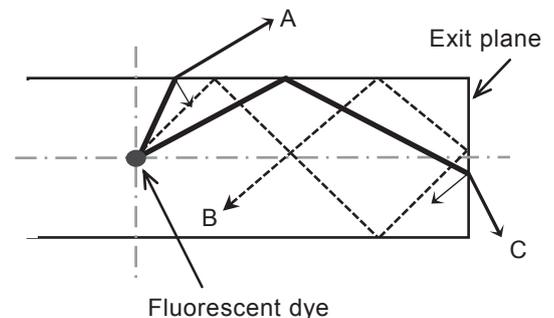


Fig. 13 Behavior of emission lights from a fluorescent particle.

#### 4.4 蛍光導光板への入射角依存特性評価

太陽光等の光源に対して追尾システムを用いないでどの程度の変換効率が得られるかを評価するために、正方形の蛍光導光板で、蛍光放射強度に対する入射角依存特性を増大係数  $A$  を用いて評価した。

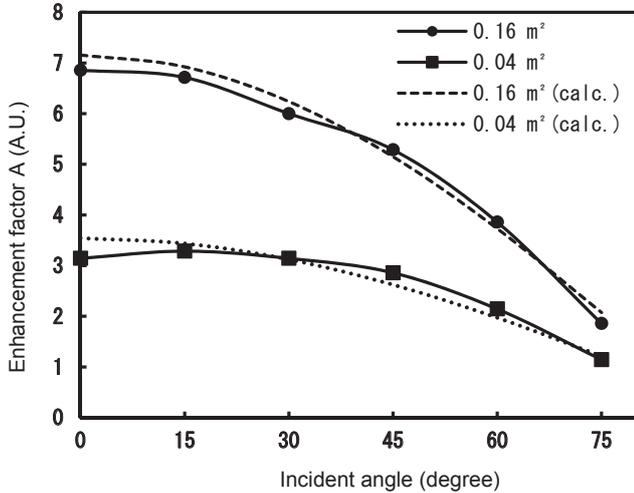


Fig. 14 Incident angle dependences of enhancement factor  $A$  of the fluorescent planar waveguide for different areas of  $0.16$  and  $0.04$   $m^2$ . Solid and broken lines correspond to experimental and calculated values, respectively.

蛍光導光板の面積を  $0.16$   $m^2$  及び  $0.04$   $m^2$  と変えた場合において、それぞれ入射角を  $0^\circ \sim 75^\circ$  まで変化させ  $A$  を求めた場合の計算および実験結果を Fig. 14 に示す。破線の結果は、それぞれ入射角  $0^\circ$  での実験結果より、 $\cos \theta$  で導いた計算値を示す。各面積の蛍光導光板において、入射角依存特性は、入射光に対する入射面の実効面積が  $\cos \theta$  に比例するため、入射角に対して余弦則に従うことが確認できた。また蛍光導光板の板厚、および縦横比の変化についても同様の評価を行った結果、面積変化の場合と同じ傾向を示し、余弦則に従う結果となった。実験値の  $A$  の値が余弦則に比べ若干大きくなるのは、光源の照明光が直接測定器へ入射してしまっていることによる誤差と思われる。

#### 4.5 評価結果のまとめ

蛍光導光板の蛍光放射強度に対する形状依存特性を、増大係数  $A$  を用いて評価した。面積依存特性については、蛍光導光板の面積が増加するに従い増大係数  $A$  は上昇し、次第に飽和傾向を示した。面積の増加とともに入射光量は増加するが、同時に散乱や蛍光導光板外への放射、吸収も増えるためと考えられる。板厚依存特性については、板厚が増加するに従い増大係数  $A$  は減少した。板厚の増加とともに入射光が蛍光体へ吸収される確率は増加するが、蛍光体による放射光が出射端面に達するまでの光路長は長くなるため、再吸収及び散乱等による伝播損失が大きくなることが考えられる。縦横比依存特性については、縦横比が増加するに従い増大係数  $A$  も増加した。4.3 節で記したように、出射端面からの奥行長  $b$  が長いほど、

出射端面からみた、有効な光線をもつ蛍光体粒子の数が多くなる。このことから、(b/a)の増加とともに増大係数  $A$  が増加したと考えられる。各形状に対する入射角依存特性については、どの形状においても基本的には入射角に対する余弦則に従う結果となった。

## 5. シミュレーションモデルの構築とシミュレーションによる実験結果の検証

### 5.1 照明設計解析ソフトウェアでの蛍光体粒子による Mie 散乱のシミュレーション

体積光源と Mie 散乱を考慮したモデルを Fig. 15 に示す。材料は PMMA を用い、屈折率は  $1.49$  とし、散乱粒子の屈折率は比重と分散時の屈折率上昇から、 $1.508$  とした。光源には蛍光導光板と同じ大きさで、発光点光源が光源内で一様に分布し、光線も全方向に一様に射出する体積光源を用い、蛍光導光板と同じ位置に配置した。光源の強度は蛍光導光板の体積に比例して増加すると考え、単位体積当たりの強度を  $0.2$   $W/cm^3$  とした。また粒子形状は球とし、粒子径及び濃度は、蛍光体に関する特許資料<sup>12)</sup>から  $1$   $\mu m$ 、 $10$   $\mu m$  の二通り、濃度は  $0.1\%$ 、 $0.01\%$ 、 $0.005\%$  の三通りでシミュレーションを行った。シミュレーションには照明設計解析ソフトウェア (Light Tools : Synopsys, Inc.) で用いた。シミュレーション結果と実験結果との比較から、蛍光導光板の形状や端面処理による端面からの蛍光発光の形状依存特性の評価を行った。

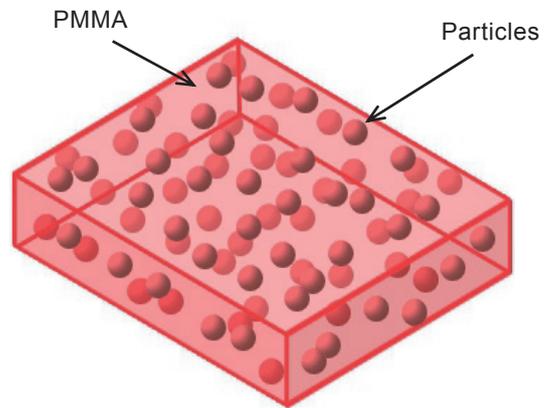


Fig. 15 Schematic diagram of the simulation model.

### 5.2 蛍光導光板面積依存特性のシミュレーション検証

増大係数  $A$  の蛍光導光板の面積変化に対する蛍光体の粒子径および蛍光体濃度の影響を確認するため、5.1 節で記したパラメータを用いた複数のモデルで面積依存性のシミュレーションを行った。粒子径  $1$   $\mu m$  とした場合の増大係数の面積依存特性を Fig. 16 に、粒子径を  $10$   $\mu m$  とした場合の面積-増大係数特性を Fig. 17 にそれぞれ示す。

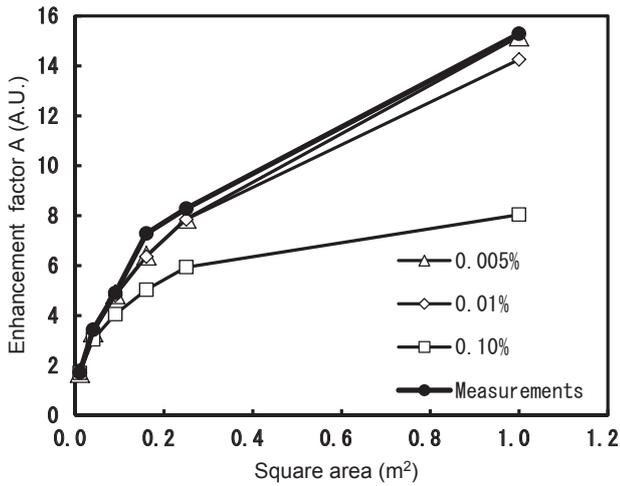


Fig. 16 Experimental and simulation outcomes of area dependence of enhancement factor A of fluorescent planar waveguide at different densities of fluorescent particles with the particle size of 1  $\mu\text{m}$ .

濃度が0.1%のシミュレーション結果では、粒子径1  $\mu\text{m}$  および10  $\mu\text{m}$  の場合ともに実験結果との差異が認められるが、濃度0.01%および0.005%においては実験結果をよく再現した。また今回の散乱モデルで使用しているMie散乱では粒子径が入射光の波長に近づいていくと、散乱角および吸収が増加するため、以降のシミュレーションモデルは、粒子径10  $\mu\text{m}$ 、濃度は最も実験結果に近い0.01%で形状効果の確認を行った。

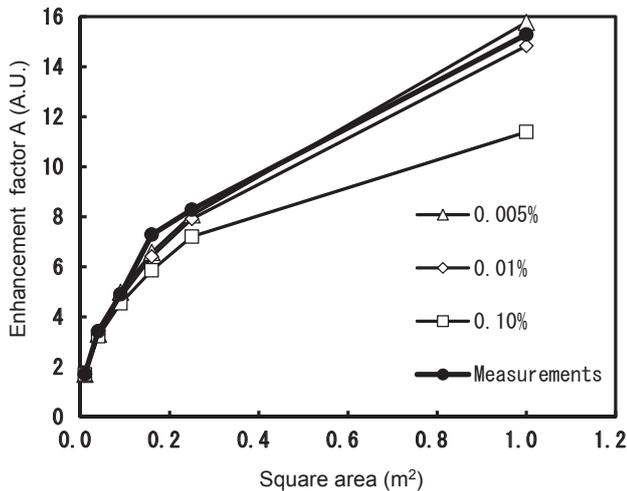


Fig. 17 Experimental and simulation outcomes of area dependence of enhancement factor A of the fluorescent planar waveguide at different densities of fluorescent particles with the particle size of 10  $\mu\text{m}$ .

### 5.3 蛍光導光板板厚依存特性のシミュレーション検証

5.2節に示した、粒子径10  $\mu\text{m}$ 、濃度0.01%の蛍光導光板モデルを用いた、増大係数Aの板厚依存性シミュレーション結果をFig. 18に示す。板厚が薄い場合において評価実験とシミュレーションの差が若干認められるが、基本的には板厚の違いによる形状効果もシミュレーションで再現可能であると考えられる。

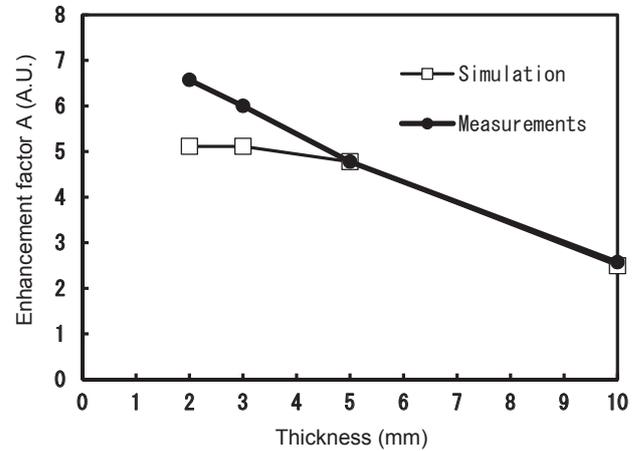


Fig. 18 Experimental and simulation outcomes of thickness dependence of enhancement factor A of the fluorescent planar waveguide.

### 5.4 蛍光導光板縦横比依存特性の検証

蛍光導光板の縦横比による増大係数Aの値を5.3節と同じシミュレーションモデルで検証した結果をFig. 19に示す。縦横比によらず、評価実験の結果とシミュレーション結果が良く一致しており、5.3節同様我々が提案したシミュレーションでの再現が可能であるといえる。

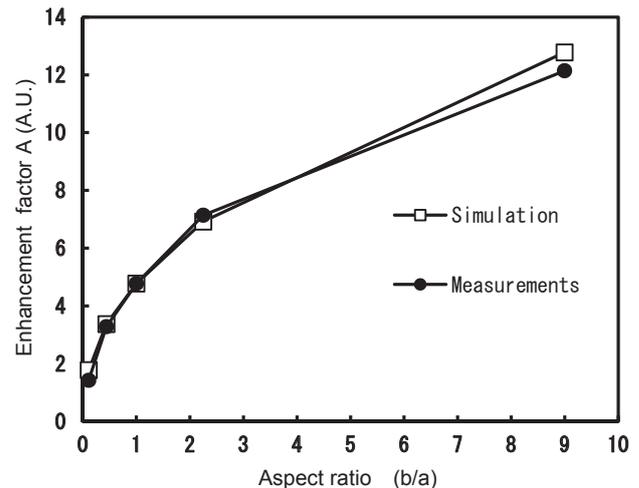


Fig. 19 Experimental and simulation outcomes of aspect ratio (b/a) dependence of enhancement factor A of the fluorescent planar waveguide.

### 5.5 シミュレーション検証結果のまとめ

形状効果に対するシミュレーションにおいて、Light Tools を用い、母材に蛍光体粒子が一様に分布した散乱モデル (Fig. 15) を用いることで形状パラメータの影響を評価できることを確認した。今回構築した粒子径 10 μm, 蛍光体粒子濃度 0.01%, 全体が一様に発光している蛍光導光板モデルが、面積依存特性、板厚依存特性、縦横比依存特性について実験結果の良好な再現が可能であることを確認した。

## 6. シミュレーションを用いた集光効率向上の検討

### 6.1 検討に用いたシミュレーションモデル

集光効率を向上させるアイデアを検証することを目的とし、5章で構築したシミュレーションモデルを用いて、蛍光導光板端面への反射加工のシミュレーションを行った。

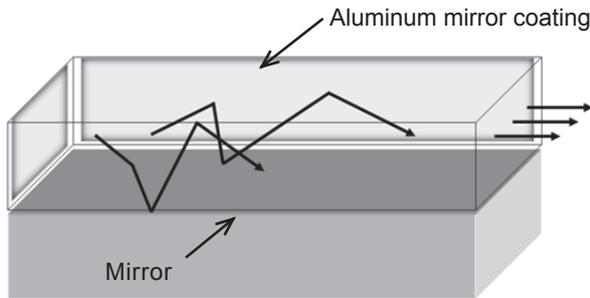


Fig. 20 Schematic diagram of the fluorescent planar waveguide with enhanced light collection efficiency by coating aluminum mirror over the side edges of the plate and setting an aluminum mirror under the bottom plane of the plate.

蛍光導光板の出射端面以外の端面にアルミニウム蒸着処理を施すことで、蛍光を出射端面に集約するアルミ蒸着モデルについて検証した。さらに入射面と反対側の面に、0.5 mm の間隔をあけて反射鏡を設置し、アルミニウム蒸着と合わせ、出射端面および入射面以外のすべての面に反射処理を施したアルミ蒸着+ミラーモデル (Fig. 20) についても検証した。

### 6.2 集光効率向上の実験結果との検証

シミュレーションにおいて、すべての反射面の反射率は、可視領域の波長におけるアルミ蒸着面の反射率より 0.9 とした。反射処理を施していない状態の出射端面光強度の値を 1 とした場合のそれぞれのモデルの出射端面光強度を Table 1 に示す。シミュレーションモデルにおいて、アルミ蒸着モデルとアルミ蒸着+ミラーモデルに有意な差が認められなかったのは、蛍光発光を再現したモデルではないため、ミラーによって反射した光線による蛍光が考慮されないためと考えられる。

Table 1 Simulation outcomes of simulation model for the two types of enhanced light collection efficiency arrangements.

Simulation and experimental process	Aluminum coating	Aluminum mirror coating and Mirror
Simulation Outcome	1.73	1.74
Experimental Results	1.62	1.72

## 7. 結言

再生可能エネルギーにおける太陽光発電の高効率化を低コストで実現することを目的とし、蛍光導光板に着目した。本研究においては太陽光の入射角度依存の少ない集光デバイスとしての蛍光導光板の集光効率を、主に蛍光導光板の形状に着目し、定量的に評価することを試みた。実際の評価においては、蛍光のピーク波長における入射光の入射強度と蛍光放射強度との比を増大係数 A として定義し、蛍光導光板の形状依存特性による集光効率の比較を相対的に行うことで、蛍光導光板の集光デバイスとしての特徴を定量的な値で示すことが可能であることを確認した。

蛍光導光板の光学シミュレーションモデルとして、蛍光体からの放射を体積光源と考え、散乱粒子の径と濃度を適正に選択した粒子散乱モデルを考案した。照明解析ソフトウェア Light Tools を用いて、シミュレーションを行った結果、蛍光導光板の形状や端面の処理などの集光特性を再現し、このモデルの有効性を確認した。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、各種の調査、実験、シミュレーションにおいて協力をしていただいた東海大学大学院修士課程の向原悠香氏、並びに丸茂電機株式会社の馬場洵子氏、小城緋嘉里氏に深謝致します。

## 参考文献

- 1) NEDO, 再生可能エネルギー技術白書(第2版)第1章, (2014) pp.11-15.
- 2) 資源エネルギー庁: エネルギー白書 2015, (2015) pp.109.
- 3) 佐藤勝昭, 「太陽電池」のキホン(第1版)ソフトバンククリエイティブ, (2011) pp.14-17.
- 4) NEDO, 再生可能エネルギー技術白書(第2版)第2章, (2014) pp.7.
- 5) NEDO, 再生可能エネルギー技術白書(第2版)第2章, (2014) pp.12.

- 6) SHARP KABUSHIKI KAISHA : Solar cell module and solar power generation device, United States Patent Application 20130025679, January 31, 2013.
- 7) 羽根義, LSC (蛍光形太陽光集光板) を用いた太陽エネルギーの波長別有効利用システムに関する研究 (その1) : 清水建設研究報告書 48 (1988) 97.
- 8) 油谷健吾, 安倍由晴, 平田陽一, 谷内利明, 谷辰夫, 蛍光染料による太陽電池の特性向上に関する研究: 信学技報 (2003) 37 .
- 9) NEDO, 太陽光発電開発戦略, (2014) pp.15.
- 10) LEDs Magazine, LED 光源で植物の生長を促進, 赤色光/青色光の波長がカギに, (2011.09) pp.14-18.
- 11) Chandrashekhar J. Joshi : Development of Long Life, Full Spectrum Light Source for Projection Display, SID Symposium Digest of Technical Papers, 38, (2007.05) pp.959-961.
- 12) SHARP KABUSHIKI KAISHA : Fluorescent material, fluorescent coating material, phosphor substrate, electronic apparatus, and led package, United States Patent Application 20150171372, June 18, 2015.