

## ■やさしい照明技術■

## 拡散板の機能と特性 (1)

Characteristics and Functions of Diffusers (1)



1934年生。1957年東京都立大学工学部電気工学科卒。1968年工学博士。現在、埼玉大学名誉教授。著書「光の計測マニュアル」など。

名誉会員 中川靖夫  
Yasuo Nakagawa

◀キーワード：拡散，緩和，偏光解消，出射光利用率，均斉度

## 1. まえがき

拡散板(面)は照明器具や測定器に広く使用されている、なじみのある材料であるが、その機能や特性は定性的あるいは感覚的に述べられることはあっても、数値的・定量的に検討されたことは少ないようである。これは、「拡散」という効果の概念が漠然としたものであり、使用者が拡散板に期待する効果が定性的なものに留まっているためと思われる。

一般に、拡散板(面)の機能として期待されているのは、指向性のある光ビームを広げて輝度を低下させる緩和効果と、配光を完全拡散特性に近づける角特性の補正効果であるが、この2つが同じものなのか、あるいは互いにどのように関連しているのかなどについては定量的に論じられたことはほとんどないようである。

従来の、電球や放電ランプなどの光源の配光の指向性は、特別なものを除いて、あまり強いものでないために、照明器具に用いる拡散板の緩和特性や拡散特性にはあまり強い要求はなかったようである。

また、拡散板を用いた測定器(照度計など)についても斜め入射角度特性(角度補正)についての規制はあっても、受光面の応答むら(緩和)については規制がないのが現状である。

しかし、発光ダイオードのような指向性の強い光源が多用されるようになると、光の制御や測定のために使用する拡散板(面)に対する要求は厳しくなってくると思われる。

本稿では、拡散板を的確に使用するための一助として、測光器を念頭においた透過形の拡散板について、機能の解析と実際の製品の評価結果を述べる。なお、本稿では、「拡散板」と「拡散面」を特に区別せず同義で使用することをお断りしておく。

## 2. 基本的な概念

## 2.1 光の拡散と散乱

光が物体(媒質)にあたると、その一部は表面で反射し、一部は内部で吸収され、一部は物体を透過(通過)する。このときに、光が反射あるいは屈折の法則に従って進行する経路を含む多方向に発散する現象が散乱(scattering)である。拡散(diffusion)は散乱と同じ現象であるが、概念的には、散乱がランダムな状態を想起す

るのに対して、拡散は完全拡散という状態を理想とした、ある程度の規則性を持つ状態とみることができよう。

## 2.2 透明と不透明

媒質を透過する光線のほとんどが屈折の法則に従って進行するときは、その媒質を通した物体あるいは光源の像(の輪郭)は、媒質がないときと同じ状態に観測される。透明(transparent)とはこのような状態で、これが光の正透過状態である。

透過する光の一部が散乱すれば、その媒質を通して観測される像は輪郭のはっきりしない、ぼやけたものとなる(物あるいは光源があるのは分かるが形がよく分からない)、このような状態が半透明(translucent)である。

透過する光の大部分が散乱すれば、その媒質を通して観測される像(光源)は明暗は分かるが、輪郭は分からない(明暗だけは分かる)、このような状態が不透明(opaque)である。

拡散は半透明から不透明の状態であると考えられることもできる。

なお、不透明はしばしば不透過と同じ意味に使われるが、不透過は光が遮断された状態のことで、不透明だから不透過になるわけではない。

## 2.3 完全拡散(均等拡散)

光が散乱透過するとき、媒質界面の法線方向の光度(放射強度)を $I_0$ 、法線からなす角を $\theta$ とすると、発散する光の光度 $I(\theta)$ が(1)式に従う状態を完全(均等)拡散という。

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta \dots\dots\dots(1)$$

この式はランベルト(Lambert)の法則と呼ばれる。

## 3. 拡散板(面)の機能(図1~図4)

一般に、拡散板に期待されている機能は大別して、(1)配光を完全拡散に近づけること、あるいは透過(反射)光の光束(光度)を(1)式に近づけること(配光制御効果)、(2)透過(反射)光の配光の均斉度を改善すること(緩和効果)、(3)偏光を解消すること、である。

この3機能は互いに関連しているが、この1つが満足されていても、他も十分であるとは限らない。

## 3.1 配光制御効果の要件

理想的な透過拡散板の特性は、図1に示すように、法線方向の光度(と全光束)が入射角の余弦に比例し、相

対的な配光特性が、入射光の入射角に依存しないで、式(1)に従って図のOPを直径とする円で表されるような特性である。このような特性は、例えば、透過する光束を全部利用できる照明器具のようなものについては望ましいものであるが、照度計の受光面の斜め入射角度補正(照度計の指示を照度の余弦の法則に従うように補正すること)に対しては必ずしもベストではない。このような用途では、出射光は拡散面の出射面に対向した限られた面積の光センサーを照射するだけ、つまり、拡散面からの配光の一部分しか利用できないので、光の利用率が非常に悪くなる(数%程度になる)。したがって、このような用途については、図2のような配光の拡散面が望ましいわけである。

### 3.2 緩和効果の要件

この場合も照明器具に使用して、輝度の高い光源の輝度を下げて、輝度の均斉度をよくする目的であれば、配光制御と同様に図1のような特性があればよい。照度計の受光面に使用して受光面の応答むら(受光面の部分によって応答が異なること)を解消する目的では、図2に

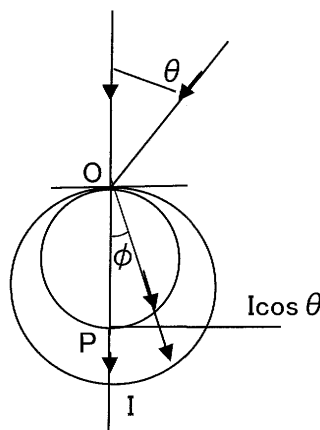


図1 理想的な透過拡散  
Fig.1 Ideal diffusion.

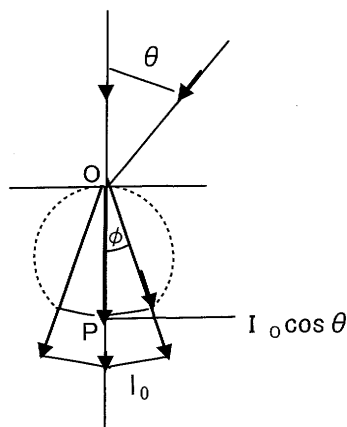


図2 受光面積が限定された用途に望ましい透過拡散  
Fig.2 Partial isotropic diffusion for limited receiving area.

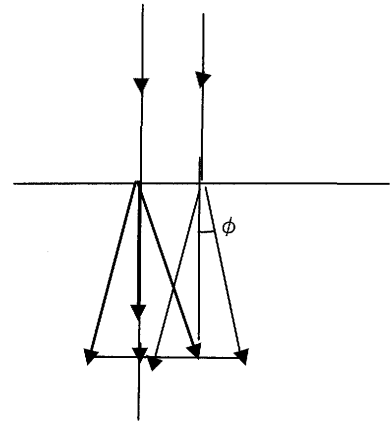


図3 受光面上の照度分布を均斉にする透過拡散  
Fig.3 Partial uniform distribution for limited receiving area.

近似した、図3のような特性が望ましく、出射光ビーム断面の照度分布は拡散板の出射面に平行な面について一定であることが理想的である(出射光ビーム断面配光の配光が均等拡散であれば、拡散板の出射面に平行な面についての照度分布は出射角を $\phi$ として、 $\cos^3 \phi$ に比例する)。

### 3.3 偏光解消効果

偏光とは、光(波動)の振幅が、光の進行方向と直交する面内で、波動のなす角度によって異なる現象で、光源からの発光や、それが照明器具などで反射した光は多少なりとも偏光している。人間の視覚は偏光には影響されないとされているが、測光器や光センサーのなかには、偏光の程度によって応答が変動するものもある。偏光は光を散乱させることで解消できるので、拡散板にはその能力が期待されている。

## 4. 拡散板(面)の波長特性<sup>1)</sup>

拡散板(面)は、その機能に波長依存性があることは望ましくない。しかし、実際問題として、前述した3機能を分光的に調べることは多くの場合に困難が伴う。そこで、判断の目安として、分光透過(反射)特性を測定することが有効である。拡散状態や偏光状態に大きな変化があれば、それが透過(反射)特性に何らかの影響をもたらす可能性があり、また分光的な測定で、使用できる波長範囲を知ることができる。

## 5. 拡散板(面)の種類

拡散板(面)には、透過拡散によるもの(透過形拡散板)と反射拡散によるもの(反射拡散板)があり、透過形は照明器具のカバー、測光機器の入射面などが主な用途である。反射形は測光、測色機器の標準(参照)反射面、積分球内面などに使われている。照明器具にも拡散性の反射面が使用されるが、拡散板という概念で考える

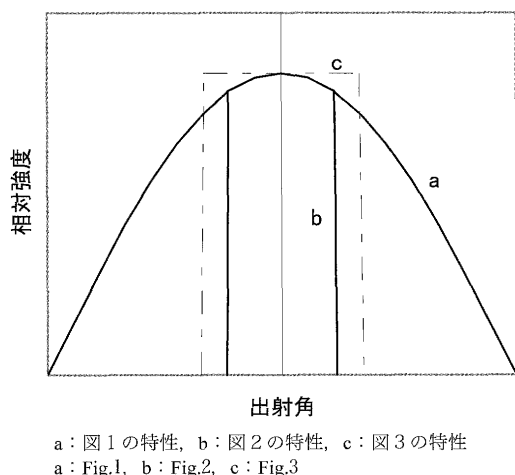


図4 直交座標で示した拡散特性  
Fig.4 Diffusion characteristics at X-Y coordinate.

ことは少ないようである。

機能的にみると、透過形は表面での反射や内部での散乱（繰り返し反射）のために、入射した光の一部が失われるため、透過して拡散光として利用できる割合（透過率）は、一般に拡散性がよくなるほど低くなって、50%以下になることもある。これに対して、反射形では、良好な材料を用いれば、100%に近い反射率で良好な拡散光が得られる。

しかし、実用的な機能（使いやすさ）から透過形が多用されているのが現状である。

### 5.1 透過形拡散板の種類

#### (1) ガラス系統のもの

ガラスの表面を砂摺りやエッチングしたもの（摺りガラス）、拡散性の層を貼り付けたもの、ガラス内部に粉状の物質を拡散させたもの（オパールガラス）などがあり、主として測光目的に使用される。紫外域まで使用するために砂摺り石英板を用いることもある。

#### (2) プラスチック系統のもの

アクリル、塩化ビニルなどのプラスチックをベースにしたもので、製法や添加する材料などによって、半透明からほぼ均等拡散性のものまで、広い種類がある。汎用的に広く用いられる。

### 5.2 反射形拡散板（面）の種類

#### (1) 粉体によるもの

硫酸バリウム、PTFE樹脂（テフロン）などの粉末を容器に入れて圧縮した面が、反射測定の（参照）標準や測色の白色標準に用いられる。実用性を高めるために粉体（アルミナなど）を圧縮してから焼結したものもある。硫酸バリウムなどを適当な溶剤（ポリビニルアルコールなど）に拡散させた塗料を金属面などに塗布した拡散面は、測光・測色の積分球の内面に広く使用されている。

#### (2) ガラス、セラミック系統のもの

オパールガラスやアルミナ磁器などを測色機器などの

常用（参照）反射標準として用いることがある。清拭や洗浄ができるためである。

### (3) PTFE樹脂

PTFE樹脂（テフロン）のブロックを積分球内面に嵌め込んだ拡散面が非常に優れた拡散反射特性を示すことが報告されている<sup>2)</sup>。このほかにも樹脂（プラスチック）系統の材料は考えられるが、具体的なデータは未見である。

## 6. 拡散板（面）の特性測定法

前述した拡散板に期待される、配光制御、緩和、偏光解消などの効果を評価するための基本的な測定とその方法を、透過形拡散板について述べる。

### 6.1 分光透過特性

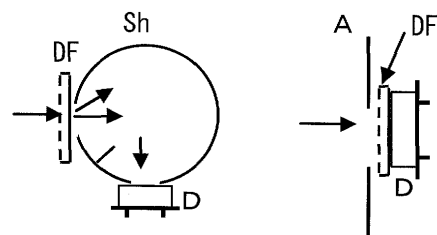
拡散板が使用できる波長範囲と、その範囲での透過特性を調べるためには、分光透過特性を測定する。この測定は出射する拡散光をすべて取り込む必要があるため、測定試料を積分球の窓に嵌め込むようにするか、試料の入射面積よりも十分大きな受光面積の平面形の受光器を試料の出射面に密着させて、分光的に行わなければならない（図5）。

### 6.2 配光特性

ゴニオメータか、試料の出射光の（平面）角度特性が測定できる装置が必要である。出射特性は、光源から試料への入射が法線方向の場合だけでなく、入射角を変えた状態でも測定しなければならないので、光源からの入射角と出射光を受光する出射角が互いに独立して設定できる、複式（2重）ゴニオのような機能が必要である（図6）。この測定は、入射角、出射角が大きい状態では出射光の強度が極端に低下するので、迷光の除去に細心の注意が必要である。入射光は分光されていれば理想的であるが、実際上むずかしいので、電球光のような波長的な連続光をある程度波長範囲を区切って使用するのが实际的であろう。

### 6.3 緩和特性

この特性は、透過や配光のような普遍性のあるものでなく、条件によって変動するので、対象と設置条件をはっきり定めて行う必要がある。



A: アパーチャ D: 受光器 DF: 拡散板 Sh: 積分球  
A: Aperture D: Detector DF: Diffuser Sh: Integrating Sphere

図5 拡散透過板の透過率測定  
Fig.5 Transmittance measurement of diffusers.

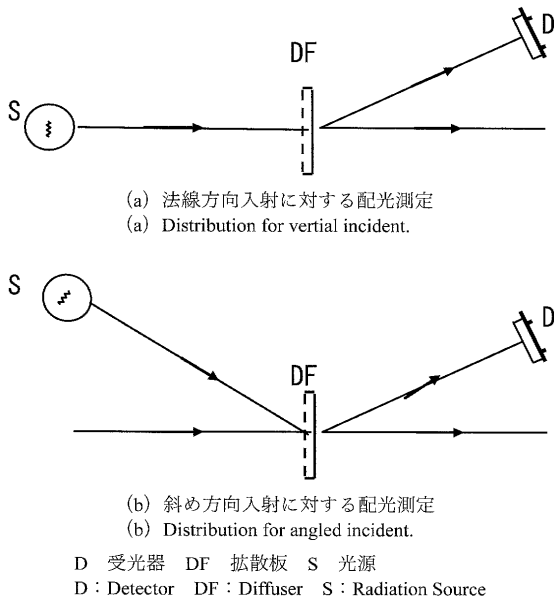


図6 透過形拡散板の配光測定  
Fig. 6 Measurements of exit intensity distribution.

例えば、拡散板と光センサーを組み合わせた受光器の受光面の応答度のむらを測る場合であれば、拡散板の入射面積、光センサーの受光面積、拡散板と光センサーの位置関係を定めて、入射面にスポット光を投射して走査したときの光センサーの応答を求める。

このような場合では、緩和効果は拡散板から光センサーまでの距離に大きく依存するので、この距離をパラメータとすることも考慮すべきである。

### 6.4 偏光解消特性

光源（電球など）の発光を偏光子（偏光フィルタなど）をとおして直線偏光にして拡散面に入射し、拡散面の出射面からの光を検光子（偏光子と同じもの）をとおして受光器に与えて、出射光の偏光状態を測定する（図7）。まず、拡散面がない状態で、検光子を光軸（検光子の中心を光軸に合わせる）回りに180度回転させて、回転角度 $\theta$ に対する受光器の出力を求めて最小値がほぼゼロであること（ほぼ直線偏光であること）を確認する。次に拡散面を光路に入れて同様の測定を行って、最大値 $I_{\theta,max}$ と最小値 $I_{\theta,min}$ を求める。拡散面の出射光の偏光度と拡散面の偏光解消度は(2)、(3)式のようになる。

$$\text{偏光度} = \frac{I_{\theta,max} - I_{\theta,min}}{I_{\theta,max} + I_{\theta,min}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2)$$

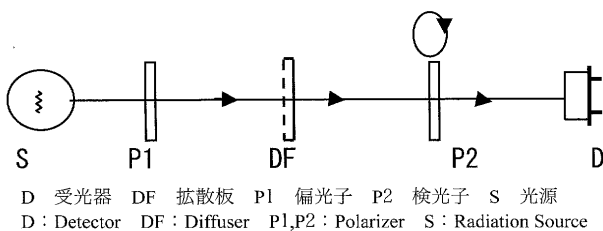


図7 透過形拡散板の偏光解消能力測定  
Fig.7 Measurement of depolarization.

$$\text{偏光解消度} = 100\% - \text{偏光度} \quad \dots\dots\dots(3)$$

## 7. 配光特性と緩和効果の評価

### 7.1 配光特性の評価

配光の評価を数量的に行うことは困難であるし、同じ配光でも使用目的が異なれば評価も異なってくる。ここでは、評価に際しての原則的な事項を述べるに留める。

#### (1) 配光状態

原則的には、配光が均等拡散に近いことが拡散面の評価の基本であろうが、図2、図3のような配光が好ましいこともあるので絶対的なものではない。

拡散面を使用する場合の普遍的な評価の条件は次のようになる。

- (a) 配光が光軸に対して対称であること
- (b) 配光の不規則な変動がないこと
- (c) 配光の相対的な形状が入射の状態（入射角など）によって変化しないこと
- (d) 配光の相対的な形状が入射の波長によって変化しないこと

#### (2) 出射光の利用効率

透過形の拡散面では、透過率と拡散性は相反する (trade off) の関係にあり、拡散性をよくすると反射損失などが増加して、利用できる透過光は減少する。したがって、このバランスを考えることも必要である。

照度計の入射面のような、拡散面の出射光の一部しか利用できない場合は、透過率にさらに(4)式のような利用率が重なることになる。

$$\text{出射光の利用率} = \frac{\int_{\theta=0}^{\theta_1} I(\theta) \cdot \sin \theta d\theta}{\int_{\theta=0}^{\pi} I(\theta) \cdot \sin \theta d\theta} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $I(\theta)$ は出射光強度の配光特性、 $\theta_1$ は拡散面の中心から受光面を見込む角（半角）である。なお、この式は拡散面と受光面が接近する状態では、補正が必要になる。

### 7.2 緩和特性の評価

拡散面と光センサーを組み合わせたときの緩和効果は、応答度分布図 (contour map) と均斉度で評価できる。

#### (1) 応答度分布図

6.3項で述べた、入射面の空間的な走査のデータから、平面的な等応答線図、立体的な (3D) 応答度分布図を作成して評価する。これは状態を視覚的 (直感的) に掌握するには便利であるが、このままでは定量的な評価には適さないので、均斉度と併用するのがよい。

#### (2) 均斉度

応答の空間的なむらの度合いを数量的に評価するには均斉度を用いる。

前記した走査データから、最大値 $S_{max}$ 、最小値 $S_{min}$ 、

平均値  $S_{ave}$ , 全測定値の標準偏差  $\Delta S$ , を求めて, (5)式または(6)式から均斉度を求める.

$$\text{均斉度} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{ave}} \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{均斉度} = \frac{\Delta S}{S_{ave}} \quad \Delta S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - S_{ave})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(6)$$

(5)式は簡単であるが, 最大値または最小値が突出した

値であると評価が低くなりすぎる. (6)式であれば全体を見通した評価ができる.

次回以降では, 以上の事項に基づいて測定した, 実際の拡散板についての諸特性と, その評価を示す.

#### 参考文献

- (1) 照明学会編：光の計測マニュアル, 4.6 (1990).
- (2) 部 洋司：高精度分光反射率測定法の開発および標準化に関する研究, 第4章, 2007年度 明治大学博士学位請求論文

### 照明学会誌原稿募集

現在, 学会誌は年13号発行されております. このうち4号は論文号, 1号は年報号として発行され, 残りの8号が特集号となっております.

その中で一般記事のみの学会誌の発行も企画いたしております. 記事の種別は問いませんので, 皆様からの積極的なご投稿をお待ちいたしております.

記事の種別：論説, 座談会, 技術総説, 資料, 施設報告, 解説, ミニ解説, 誌上討論, 研究室紹介, 会議報告, 寄書, 会員の広場, やさしい照明技術, 楽しいあかりのヒント, 私の視点, 支部だより

執筆要領：「寄稿のしおり (一般号・年報号)」(照明学会HPに掲載)をご参照下さい.

掲載号：学会誌編集委員会で決定いたします.

申込先：〒101-0048 千代田区神田司町2-8-4 吹田屋ビル3階

TEL：03-5294-0101 FAX：03-5294-0102

E-mail：ieijjour@sepia.ocn.ne.jp URL：http://www.ieij.or.jp/

原稿提出先：社団法人照明学会 学会誌編集担当：中村三七雄