

知っておきたいキーワード

測光量

(正会員) 大田原一成[†]

[†] 株式会社JVCケンウッド

"Photometric quantities" by Kazushige Ohtawara (Strategic Research & Development Division, JVCKENWOOD Corporation, Kanagawa)

キーワード：測光量，光度，照度，輝度，光源，ディスプレイ



おおたわら かずしげ

大田原一成 1985年，千葉大学大学院工学研究科修士課程修了。同年，日本ビクター（株）入社。LCOSデバイス開発に従事。1992年～1995年，ATR光電波通信研究所。1999年～2004年，ATR環境適応通信研究所，ATR適応コミュニケーション研究所に。有機非線形光学材料，計算化学による物質設計，高次元アルゴリズム応用の研究に従事。2004年，日本ビクター（株）を経て，2011年より，（株）JVCケンウッドにて，ディスプレイの光学開発に従事し，現在に至る。正会員。

測光量とは

光の明るさを表す測光量について説明します。一言に明るさと言っても光源の種類，光が照らされている状態，対象物の使われ方や表したい内容によって，それぞれ適切な量を使う必要があります。明るさを測るとき，光のエネルギーを受光素子などで測定しますが，このように明るさを物理量として扱うとき「放射量」と言います。一方，人が感じる明るさを表すために心理的要素を考慮し，放射量を眼の感度で評価した明るさを「測光量」と言います。測光量には，光束，光量，光度，照度，光束発散度，輝度があります。いずれも映像表示に用いられる光源やディスプレイなどの基本性能を評価する場合に重要な量です。これらは，どのような場合にどの量を使えば良いのでしょうか。各測光量と光が放出されている状態との関係を図1に示します。光源

から光束が放出され，ある円錐中の光束量が光源の明るさを示す光度です。光束によって照らされた面の明るさは照度，面光源をある方向から見た明るさは輝度，面光源から光束が放出する量は光束発散度，光束を時間で積算した量が光量です。

このように光束に対し，光が放出さ

れている状態として，角度，面積，観察する方向などの幾何学的関係で測光量は規定されており，表したい内容に応じて使い分けます。ここで，対象によって使うべき測光量が異なることに注意しながら，それぞれについて整理していきます。

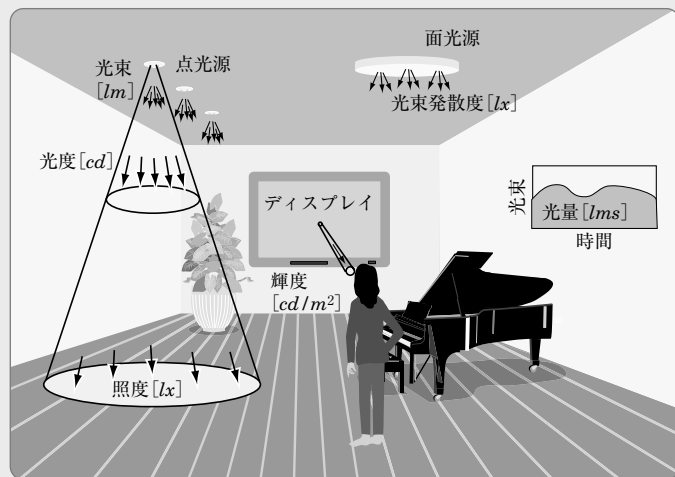


図1 測光量

比視感度

光の波長によって人の眼が感じる度合いは、色の違いだけではなく、明るさについても変わります。強い紫外光や赤外光を受けても、眼には明るく感じません。可視光の波長域では、緑色が最も明るく感じ、青色や赤色は同じ強さの光でも暗く感じます。光の波長による眼の明るさの感じ方を相対的に表した値を、比視感度または分光視感効率と言います。比視感度は、多くの人について平均して得られたものを国際照明委員会 (CIE) により、標準比視感度 (標準分光視感効率) として定めており (図2, 表1), 波長555nmで最大となる曲線になります。眼は緑色の555nmを最も明るく感じ、同じ強

さの光であっても青色の450nmは1/25, 赤色の650nmは1/10の明るさで感じています。

測光量は、測定した可視光域の放射量に、標準比視感度を係数として乗じ、波長域について加算して得られます。単位時間あたりに光源から放射された

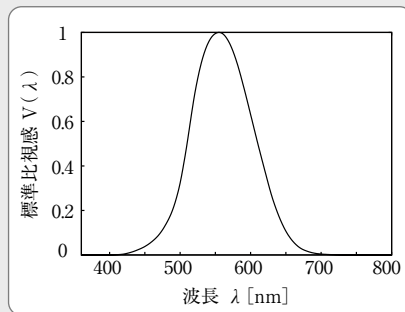


図2 標準比視感度

エネルギー量は、放射束 ϕ_e (単位はワット [W]) として測定されますが、放射束を比視感度で重みづけした量は、測光量である光束 ϕ_v (単位はルーメン [lm]) となり、最大視感度 $K_m=683 \text{ lm/W}$, 標準比視感度 $V(\lambda)$ により、 $\phi_v=K_m V(\lambda) \phi_e(\lambda)$ で表されます。

表1 標準比視感度

波長 λ [nm]	標準比視感度 $V(\lambda)$
400	0.0004
450	0.0380
500	0.3230
550	0.9949
600	0.6310
650	0.1070
700	0.0041
750	0.0001
800	0.0000

測光量

(1) 光束と光量

光源などのある面から放出される (または通過する, 入射する) 単位時間あたりの光量が光束で、単位は lm (ルーメン) です。光束は単位時間あたりの放射エネルギーである放射束 (単位は W) を比視感度で評価した測光量です。また、光量は光束を時間について積算した量で、単位は $\text{lm}\cdot\text{s}$ です。ちょうど水道の蛇口から水を出すのに似て、蛇口を開いて出る水量は、光源から放出した光束に対応し、大きく開けば光束が大きくなります。また放出された水をバケツに溜めた量は光量に対応します。

現在、振動数 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ (波長 555 nm) の単色光の放射 1 W が、光束 683 lm と定められています。例えば単色光の場合、出力 5 mW で 555 nm (緑色) のレーザーの光束は、 $683 \text{ lm/W} \times 5 \times 10^{-3} \text{ W} = 3.4 \text{ lm}$ で、出力 5 mW で 650 nm (赤色) のレーザーの光束は、標準比視感度を乗じて $683 \text{ lm/W} \times 0.107 \times 5 \times 10^{-3} \text{ W} = 0.37 \text{ lm}$ となります。スペクトル分布があるときの光束 ϕ_v は、各波長で測定した放射束 $\phi_e(\lambda)$ に標準比視感度 $V(\lambda)$ を掛けた量を可

視光の波長領域について、次のように積分して求めます。

$$\phi_v = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda$$

電球, LED, 蛍光灯などの光源から放出される全光束を測定するには、積分球を使います。積分球は、内面を高反射率の硫酸バリウムなどで塗装し、白色の拡散反射面とした球体です (図3 (a))。積分球の中央に光源を置き、内面で繰り返し反射させて均一な強さとなった光を、受光器で測定します。大型の積分球が必要になりますが、液晶ディスプレイ用バックライトなどの平面光源の全光束測定にも使われます。

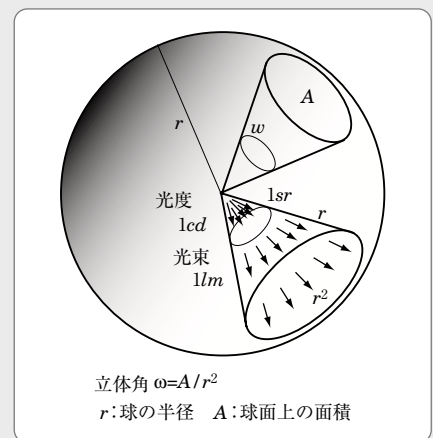
光源の全光束を電力で割った値を、発光効率 (ルーメン毎ワット, lm/W) といい、 1 W の電力でどれだけの光束を出せるか、省エネルギーの指標になります。よく使われる光源の代表的な発光効率は、白熱灯 $10 \sim 20 \text{ lm/W}$, キセノンランプ 30 lm/W , 水銀灯 50 lm/W , 蛍光灯 $60 \sim 110 \text{ lm/W}$ であり、近年急速に高効率化された白色LEDは $30 \sim 100 \text{ lm/W}$ です。

(2) 光度

光度は、光源から特定の方向に放出される光束量で、単位立体角あたりの光束で明るさを表し、単位は cd (カンデラ), または lm/sr



図3 測光量の測定器



立体角 $\omega = A/r^2$
 r : 球の半径 A : 球面上の面積

図4 光度と立体角

☞ lm/sr (ルーメン毎ステラジアン)です(図4)。点光源の場合にはどの方向にも均等に光が放射されるため、立体角が同じならば円錐の大きさによらず、円錐内の光の量(光束)は同じで光度は変わらないという便利な取り扱いができます。水道で例えると、ある角度で円錐状に広がるシャワーの水量が光度に対応します。水の場合も均等に広がるので、広がり角(立体角)を規定すれば、シャワー口に近い場所で受ける水の量と、離れた場所で受ける水の量は同じになります。このように光度は、単位立体角での光束の密度を示していて、光源からの発光の強さを表す基本単位として使われます。

立体角は、球の中心からできる錐体の球面上の面積を、球の半径の2乗で割った値で、錐体の開く度合いを示しています。半径 r 、球面上で r^2 の面積のとき、立体角 $1sr$ (ステラジアン)です。また、球全体の表面積は $4\pi r^2$ なので、全球の立体角は $4\pi[sr]$ です。

光度 $1cd$ は、古くは単位の由来の通り、ろうそく(candle) ほぼ1本からの発光量を基準に決められていました。現在、国際単位系(SI単位系)として規定されており、 $1cd$ は、振動数が $540 \times 10^{12}Hz$ (波長 $555nm$)の単色光光源のある方向における放射強度が $(1/683)W/sr$ である時の光度と規定されています。これから光束との関係は、立体角 $1sr$ 内の光束が $1lm$ であるとき、光度が $1cd$ となります。また点光源の場合は、光度を球全体で足すと全光束が求まり、 $1cd$ の点光源の全光束は $4\pi[lm]$ になります。

(3) 照度と光束発散度

照度は、ある面に入射する単位面積あたりの光束で、単位は lx (ルクス)、または lm/m^2 です(図5)。 $1lx$ は、 $1m^2$ の平面に $1lm$ の光束が入射するときの照度です。受光面に対する値なので、複数の光源から届く光束やさまざまな角度で入射する光束を含んだ量です。照度は、光で面が照らされた明るさを表し、照明器具による室内の明るさを示すなど日常生活に重要な量です。懐中電灯で壁を照らすとき、電灯を

遠ざけるほど壁は暗くなります。光源から放射状に放出される光束は、距離が大きくなるにしたがって広がるため、単位面積あたりの光束は減り、照度が小さくなるためです。点光源の場合、距離の2乗に反比例して減少し、距離が2倍になると照度は $1/4$ になります。

次に、照度は斜めから入射する光に対して、入射角の余弦(*cosine*)に比例した量となります(余弦則)。同じ光束が面を照らすとき、垂直に入射するときに対し、斜入射したときは照射面の面積が大きくなるので、照度は小さくなります。

照度計はハンディ型が流通しており(図3(b))、日常環境の照度を測ると、およそ次の値を示します。

- 晴天：100,000 lx
- 曇天：20,000～50,000 lx
- 日陰：10,000 lx
- 事務所：400～500 lx
- 家庭用蛍光灯：300 lx
- 街灯：100 lx
- 満月の夜：0.2 lx

映像表示では、プロジェクタの明るさを評価するのに照度を用います。プ

ロジェクタは、測定すべき映像を離れたスクリーンに表示するため、スクリーン面の照度で評価します。一方、プロジェクタ自身の持つ明るさは、プロジェクタを光源として見立て、明るさの能力を光束で表します。光束はスクリーン面で測定した照度にスクリーンの面積を掛けた値としても求められます。このように明るさを光束で表すと、プロジェクタとスクリーンの距離を変え、表示するスクリーンの大きさを変えたときの照度が簡単に求められます。例えば、3,000 lm の光束があるプロジェクタで、対角100インチ($2.03m \times 1.52m$)に表示するとき、スクリーン面の照度は $3,000 / (2.03 \times 1.52) = 970 lx$ となり、200インチ($4.06m \times 3.05m$)に表示するときは、 $3000 / (4.06 \times 3.05) = 242 lx$ になります。事務所の照度が400～500 lx とすると、100インチでは室内照明より映像が明るく表示できるのに対し、200インチで見える場合は、室内照明を暗くする必要があります。

照度が面に照射された光束であるのに対し、同じ次元を持つ光束発散度は、面状の光源から発散する時の単位面積あたりの光束です。

(4) 輝度

輝度は光源面を観察する方向から見た光の明るさ、または光源面から観察する方向へ向かう光の明るさであり、光源面のある方向の光度を、その方向から見た見かけ面積で割った量(単位面積あたりの光度)です(図6)。単位は cd/m^2 (カンデラ毎平方メートル)です。輝度は人が光源などの対象を見て、眼の方向へ向かう光の明るさを示し、眼で感じる明るさを直接的に表します。液晶ディスプレイや有機ELディスプレイのような直視型ディスプレイで、映像の明るさを評価するとき、輝度を用います。

観察方向を決めて評価するため、発光面や反射面の特性により輝度は変化します。鏡のように特定の角度で反射する面は、反射する方向でしか輝度が大きくなりません。どの方向から見ても輝度が一定となる面を ☞

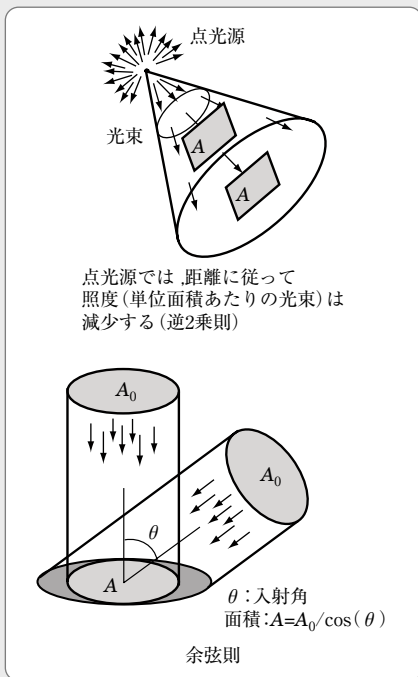


図5 照度の性質

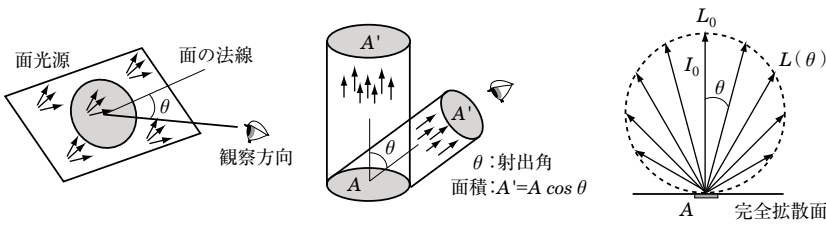


図6 輝度の性質

完全拡散面といいます。角度に対し均等に拡散反射または透過する理想的な面で、例えば乳白色の拡散板や硫酸バリウムなどの白塗装（積分球内部に使われる）が完全拡散面に近いものとして知られています。完全拡散面の輝度は、光源面（または反射面）の面積 $A [m^2]$ 、法線方向の光度 $I_0 [cd]$ 、輝度 $L_0 [cd/m^2]$ とすると、法線方向では $L_0 = I_0 / A$ です。次に斜め方向の輝度は、見かけの面積 A' は $A \cos \theta$ 、完全拡散面の光度は $I_0 \cos \theta$ なので、 $L(\theta) = I_0 \cos \theta / A \cos \theta$ となります。このように完全拡散面では、角度にしたがって見かけ面積が小さくなるのに伴い光度も小さくなるため、輝度は一定となります。

角度に対して輝度が一定でない場合、配光分布があると言います。配光分布はディスプレイを斜めから見た視野角に関係し、映像を真横から見ないのであれば、正面に光を集めた方が光利用効率が高く、プロジェクタでは配光分布を持つ特別なスクリーンが使われたり、液晶ディスプレイ用バックライト光源では、マイクロプリズムやマイクロレンズからなる輝度上昇フィルムが使われて、正面輝度を高めることが行われます。

照度は距離に従い減少しますが、輝度は距離によらずに変わらない性質があります。ディスプレイを近くで見ても、離れて見ても輝度は変わらず、明るさは変わらないように感じます。距離が大きくなれば、光源に対して視角が小さくなり眼に入る光束は減りますが、同時に、入った眼の網膜上での像の面積が小さくなり、感じる明るさが同じになるためです。夜景が見える場所に行くと、遠い場所の街灯やマンションの窓明かりを距離が離れているにも関わらず、明るく見ることが出来ます。その明るさは輝度として見ているため、近くにある建物の窓明かりと比べても大きく変わりません（光は空気中の塵埃や水蒸気で散乱や吸収を起こしながら進むため減衰はあります）。しかし、照度として、遠くの明かりで手を照らすことはできません。

輝度計（図3(c)）は、レンズで対象に焦点を合わせ、視野の大きさを規制した光学系で受光し、測光します。身近にあるものの輝度は、次のような値を持っています。PC用液晶モニター250～300 cd/m^2 、液晶テレビ400～500 cd/m^2 、ろうそく10,000 cd/m^2 。

各測光量は、次元が異なるので換算

して比較することはできませんが、完全拡散面のときは換算できます。照度 (E) と輝度 (L) は完全拡散面では、 $L = E / \pi$ の関係があります。離れた面の明るさは照度で表しますが、その面から反射して眼の方向に入る光の明るさは、輝度で表すのが適当です。白い壁が完全拡散面だとすると3,000 lm のプロジェクタで対角100インチの場合に照度970 lx だった壁面は、壁の反射率が90%として $L = 970 \times 0.9 / \pi = 278 cd/m^2$ となり、PC用液晶モニタの輝度と同等になります。

最後に、測光量を使って簡単な見積もりをしてみましょう。100Wの白熱電球は発光効率が15 lm/W とすると、全光束は1,500 lm になります。点光源を仮定すると光度は $1,500 / 4\pi$ なので約119 cd になります。電球で照らされる0.6m先の0.36 m^2 の面（立体角1srが作る面）での照度は $119 lm / 0.36 m^2 = 330 lx$ となり、事務作業できる明るさです。一方、輝度については、フィラメントが見えるクリア電球では、点光源に近く小さな発光面のため極めて高輝度（数百万 cd/m^2 ）になりますが、乳白ガラスで眩しさを防ぐつや消し電球では、電球表面で光が拡散するため次のようになります。

全光束1,500 lm 、電球の直径を6cmとすると、電球表面の照度は、 $1,500 / (4\pi \times (0.06/2)^2) = 132,600 lx$ となり、表面を完全拡散面とすると、輝度は $132,600 / \pi = 42,200 cd/m^2$ と算出されます。クリア電球に比べ眩しさが和らぎ、辛うじて直視できそうです。

むすび

照明光源は、白熱灯や蛍光灯などが中心でしたが、近年、LED、有機ELやレーザーなどが、発光効率向上や応用技術開発により、照明機器やディスプレイに搭載され、日常生活に近い存在になってきました。測光量の取り扱い、このような多様な光源とそれらを利用するシステムの性質に合わせて、ますます重要となるでしょう。

(2012年10月29日受付)

参考文献

- 1) 照明学会編, 照明ハンドブック第2版, オーム社 (2003)
- 2) 日本規格協会編, JISハンドブック 光学機器, 日本規格協会 (2008)
- 3) 映像情報メディア学会編, 電子情報ディスプレイハンドブック, 培風館 (2001)
- 4) 大田, 色彩工学 (第2版), 東京電気大学出版局 (2001)
- 5) 安藤, 光と光の記録 (光編), 産業開発機構 (2003)
- 6) 日本視覚学会編, 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店 (2004)
- 7) 日本色彩学会編, 新編色彩科学ハンドブック (第2版), 東京大学出版会 (2001)
- 8) 辻内, 光学技術ハンドブック, 朝倉書店 (2002)