

■ 快適性をはかる——光——

岩田利枝 東海大学第二工学部 正会員

キーワード：視覚(Visual Percetion), 測光量(Photometric Quantities), スペクトル分布(Spectral Distribution), 色(Color), 方向(Direction), 対比(Contrast)

はじめに

光の測定では、使用する基本単位から人間の感覚に基づいているため、常に“誤差含み”がつきまとう。また、センサである眼は0.2~10万lxという広い範囲に順応し、眼から入った刺激の再生には脳がかかわるなど、視覚のメカニズムは複雑である。このため、現状では実用的な“視的快適性指標”が得られているとはいえない。本稿では、光の特性に留意しながら、基本的なはかり方とその問題について述べる。

1. 測光量

光は通常、“眼に対して明るさを感じさせる放射”と定義され、380~780nmの放射スペクトルがこれにあたる。しかし、この可視域範囲でも、波長によって人の眼の感度が異なる。光の測定では、物理量の放射束を人の眼の感度で重みづけした光束を中心として体系化した“測光量”と呼ばれる量を用いる。

1.1 光束

標準的な人間の眼の分光感度として、標準比視感度曲線〔 $V(\lambda)$ 関数〕がCIE(国際照明委員会)によって図-1の曲線で示すように定められている。

測光量の基本である光束(単位はルーメン[lm])は、この曲線に基づき以下のように定義される。

$$F = K_m \int \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

ここで、

λ	: 波長	[nm]
F	: 光束	[lm]
$\Phi(\lambda)$: 分光放射束	[W/nm]
$V(\lambda)$: 標準比視感度	[]
K_m	: 最大視感度 683	[lm/W]

しかし、この標準比視感度曲線 $V(\lambda)$ は明るいところで働く視細胞の感度で、暗いところでは異なる視細胞が働くので、この曲線が50nm程度左にずれる(図中点線)。さらに、これらの曲線は被験者実験から求められており、実際の結果は、このようなきれいな曲線にはなっていない。このように、光の測定では単位系も“物理量”ではなく実験に基づいた“心理物理量”であるということに留意したほうがよい。

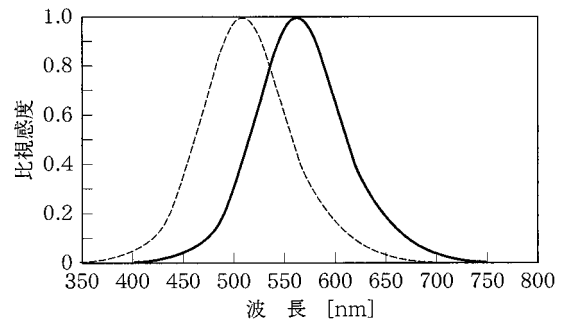
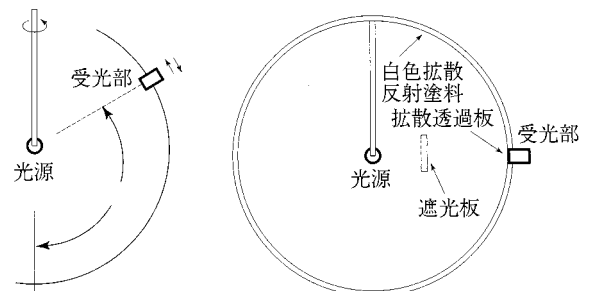


図-1 標準比視感度曲線



(a) 配光法による測定 (b) 積分球法による測定

図-2 光束の測定

測光量は、分光感度が標準比視感度 $V(\lambda)$ にほぼ比例した受光器を用いて測定する。通常は、光電素子の全面に色ガラスフィルタを配置して受光器とし、見かけの分光感度を標準比視感度に近似させている。

$$\tau(\lambda) \kappa(\lambda) = V(\lambda) \quad (2)$$

ここで、

$\tau(\lambda)$: 色ガラスフィルタの分光透過率	[]
$V(\lambda)$: 標準比視感度	[]
$\kappa(\lambda)$: 光電素子の分光感度	[]

しかし、式(2)を完全に成立させることは難しく、光源の分光分布によっては誤差が生じるので、正確な測定のためには補正が必要である¹⁾。現在は、光電素子としてシリコンフォトダイオード(SPD)を使用することが多い。光束の測定は、図-2のように行う。

光束/放射束を発光効率[lm/W]といい、理想的な発光効率の上限は式(1)の K_m となる。ランプの発光効率を示す場合には、実用上分子に光源の全光束、分母には消費電力を用いる。市販の直管形蛍光灯の効率は80~100lm/



写真-1 照度測定

W, 白熱灯では10~14lm/W程度で, 例えば37Wの直管形蛍光灯では1灯あたり3200lm程度の光束を発生していることになる。

1.2 照度

照度は, 単位面積あたりに入射する光束と定義され, この定義からすると単位は[lm/m^2]となるが, 普通は[lx] (ルクス)で示す。写真-1のように, 照度計の受光部に入射する光として測定することができる。1.1で述べたように, 受光部では色ガラスフィルタによる分光感度の補正を行っているが, 標準比視感度と完全に一致させることはできないので, 校正に用いた光源と分光分布の異なった光源を測定した場合誤差が生じる。照度計のマニュアルには, これを補正するための係数(色補正係数)が示されているので, 有彩光などを測定するような場合には, この係数による補正が必要である²⁾。

一般に, 照明設計には照度が用いられ, JISで照度基準が定められている³⁾。その一部を表-1に示す。これらは通常水平面で測定するが, 作業内容や視対象によって鉛直面あるいは傾斜面で測定することもある。

1.3 光度と輝度

照度がある面あらゆる方向から入ってくる光束(単位面積あたり)であるのに対し, 光度は光源からある方向に出ていく光束(単位立体角あたり)のことである。定義からすると, 単位は[lm/sr]となるが, 通常はこれを[cd] (カンデラ)と示す。光度は, 照明器具からの光の方向ごとの量(配光)を示す場合に用いられる。図-3に配光の例を示す。

輝度は図-4に示すように, 光度を観測方向から見た見かけの面積で割った値であり, 単位は[cd/m^2]になる。人間が感じる明るさは, この輝度と対応している。

表-1 照度基準

照度 [lx]	事務所	美術館・博物館
1500	事務室(a), 営業室, 設計室, 製図室, 玄関 ホール(昼間)	彫刻 (石・金属) 造形物 模型
1000		
750	事務室(b), 役員室, 会議室, 電話交換室, 受付	彫刻 (プラスチック・木) 洋画 売店, ホール
500		
300		
200	書庫, 金庫室, 電気室, 機械室, エレベータ	絵画 (ガラスカバー) 日本画 工芸品
150		
100	喫茶室, 休養室, 更衣室, 宿直室, 倉庫	はくせい品 標本, ギャラ リー全般, 喫 茶, 廊下, 階段
75		

(注) 事務室は細かい視作業を行う場合および昼光の影響により室外が明るく, 室内が暗く感ずる場合は(a)を選ぶことが望ましい。

印の場所は局部照明によってこの照度を得てもよい。

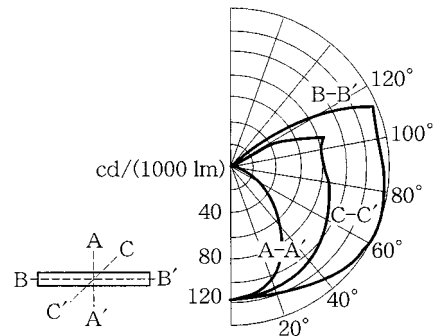


図-3 配光曲線

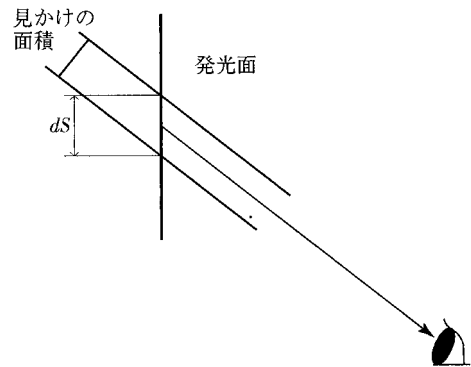


図-4 輝度



写真-2 輝度測定

輝度は写真-2に示すように、輝度計を用いて視角2度程度の非常に小さい部分を測定する。このため、空間の輝度の分布を測定しようとするとき、非常に多くの測定点が必要で多大な労力を要する。そこで、近年視野内の輝度分布を画像解析によって測定する方法が用いられるようになってきた。このような方法は、従来から写真測光法として研究されていたが⁴⁾、デジタルカメラにより簡単に行えるようになった⁵⁾⁶⁾。各シャッタースピード、絞りにおける CCD からの信号値(階調値)と輝度の関係性を求めておき、この関係を用いて全ピクセルの信号値を輝度に変換すればよい。異なるシャッタースピード、絞りで撮影した画像を重ね合わせることによって、広い輝度範囲が測定できる。ただし、魚眼レンズを用いる場合には、レンズ周辺の光量減少の補正が必要となる。また、最近のカメラはホワイトバランス、階調補正などのような「便利な機能」がさまざまついているので、これらが働かないように注意する必要がある。視野内の輝度分布を得ることにより、明暗の変化の定量的評価などが可能になる⁷⁾。

2. 分光放射束分布と光色

2.1 分光放射束(スペクトル)分布

ここまで、光の量として可視域の積分値である光束を基本とした測光量を扱ってきたが、測光量が同じでもスペクトルが異なる場合(式(1)でFが等しくても $\phi(\lambda)$ が異なる場合)、明るさは同じでもその光の色やその光に照らされたものの色の見えが異なってくる。現在分光放射輝度計が用いられることが多い。分光放射輝度計では、分光器によって特定の波長の光だけを選択し、式(1)にお

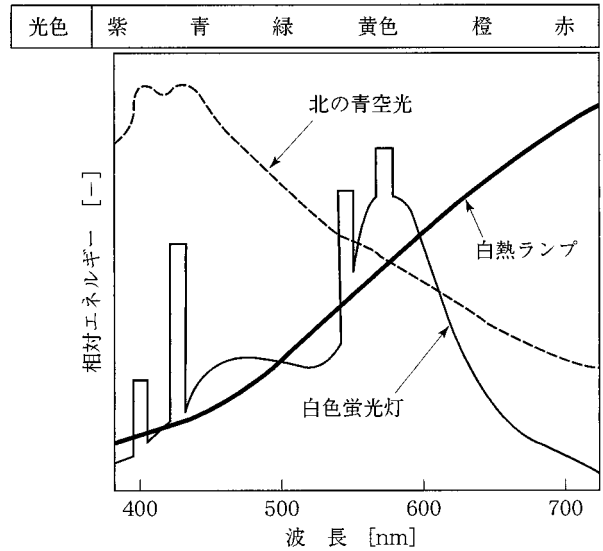


図-5 光源によるスペクトル分布の違い

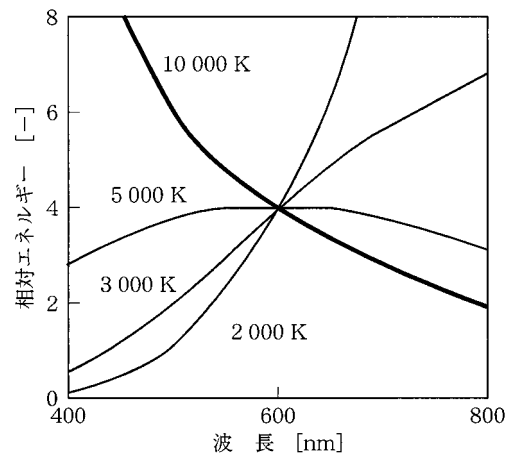


図-6 黒体のスペクトル分布

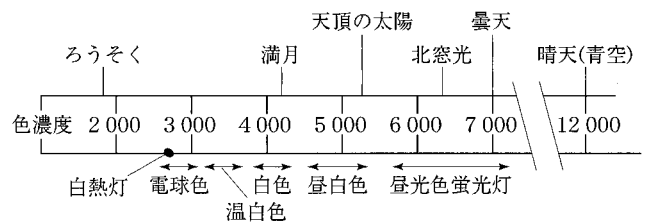


図-7 光源の色温度

ける $\phi(\lambda)$ の単位角あたり、単位面積あたりの値を測定している。測定されたスペクトル分布の光源による違いを図-5に示す。グラフ上部に示した波長ごとの光色から、スペクトル分布の形によって、その光の色がある程度は推察できる。しかし通常は、「よりわかりやすく、実用的な数値」として、以下に示す色温度や演色性が用いられている。

2.2 色温度

“色温度”は、光色を数値的に表す方法であり、黒体を熱

したときの絶対温度 K]とスペクトル分布による光色の関係(図-6)を基準としている。図-5に示したように、蛍光灯などのスペクトルは黒体のスペクトルと異なるので、相関色温度として光色が近い色温度で表される。相関色温度が低いほど赤みが、高いほど青みのある光色となる。図-7には、生活中のさまざまな光の色温度を示す。市販されている蛍光灯にも“昼光色”, “昼白色”, “白色”, “温白色”, “電球色”といったものがあるが、それぞれJISで、図中に示すような色温度範囲に決められている⁹⁾。

2.3 演色性

演色性は、光が持つ「物体の色の再現能力」を示す。光の色そのものではなく、図-5に示したスペクトルの滑らかさがかわる。基準光源¹⁰⁾で照明した物体色の見え方を100として、試験光源ではそれがどの程度ずれているかを定められた8色について数値化し、8色の算術平均を100から引いたものを平均演色評価数 R_a としている。基準光源としては、各色温度ごとの黒体放射あるいは国際照明委員会(CIE)で定められている昼光があり¹⁰⁾、試験光源の色温度と近い色温度を持つ基準光源を用いる。CIEの屋内照明ガイド¹¹⁾には、例えば一般事務室では R_a 80、医療施設診察室では R_a 90 というように個々の作業空間における最小 R_a 値が示されている。

3. 視環境の指標

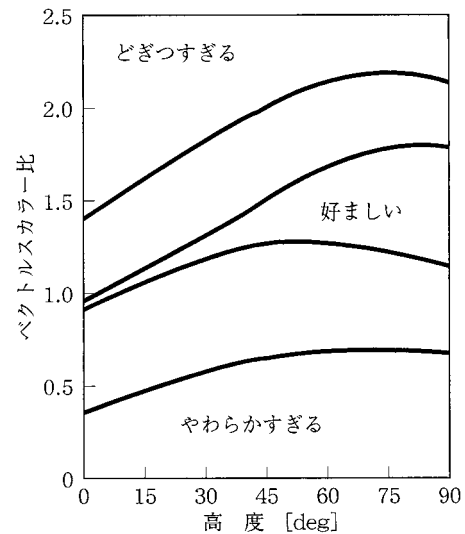
はじめに述べたように、残念ながら実用的な視的快適性指標といえるものはないに等しい。ここでは、(自戒もこめて)古典的指標を紹介する。この「古典的」は、古くから語り継がれ、問題を指摘されながらも、それ以上のものがないため生き続けている、という意味である。

3.1 立体の見え方-空間照度

光には方向性がある。これが影をつくり、立体の見え方を決める。ある点に入る光の量、方向を表す指標としてスカラー照度、ベクトル照度が提案されている。

スカラー照度とは、光の方向性に関係なくある点に入射する光の総量を示す。ある小さい球面上の平均照度のことで、通常は正四面体あるいは正六面体の各面の照度を測り、その算術平均値をスカラー照度として用いている。

ベクトル照度は、光の方向性を示すものである。ある点における正反対の向きの照度差が最大になるときの、その照度差と向きのことをベクトル照度という。ベクトル照度は、正六面体の各面の照度を測定しベクトルを合成して求めることができる。このベクトル照度のスカラー照度に対する比をベクトルスカラー比と呼び、この値とベクトル高度からモデリング(光による物体の立体感)の好ましさが図-8のように予測されている¹²⁾。



出典 野口 透：照明のモデリングに関する調査研究，照明学会誌，56 (1981)，pp.452～457

図-8 好ましいモデリングの得られるベクトルスカラー比の範囲

3.2 輝度対比とグレア

ものが見えるためには、視対象と背景の輝度差が必要である。通常は、次式で表される値を輝度対比 C が用いられる。対象物の輝度を L_t 、その背景の輝度を L とすれば、

$$L > L_t \text{ ならば } C = (L - L_t) / L \quad (3)$$

$$L_t > L \text{ ならば } C = (L_t - L) / L_t \quad (4)$$

対比が大きくなれば視対象が見やすくなる。

照明がパソコンのディスプレイ上で反射し、文字が見にくくなることを光膜反射というが、これは視対象とその周囲に反射光がかぶることによって、次式のように輝度対比が減少して起こる現象である。

$$C = [(L + L_s) - (L_t + L_{ts})] / (L + L_s) \quad (5)$$

ここで、

L_s, L_{ts} : 室内照明の反射による輝度

このような減少を減能グレアと呼ぶのに対し、不快感を引き起こすものを不快グレアと呼ぶ。こちらは過度な輝度対比が原因となる。眼が順応している輝度に対して、極めて高輝度となる部分が視野内にあることによって引き起こされる不快感のことであり、基本的には以下のような式で示される。

$$GI = k \log \Sigma (L_s^a w^b / L_b^c P^a) \quad (6)$$

ここで、

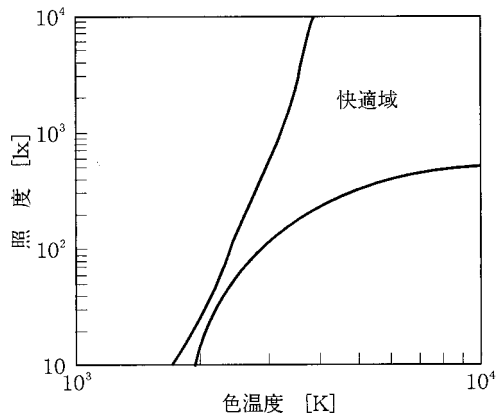
GI : グレアインデックス(グレアの度合いを示す)

k : 係数

L_s : 光源輝度

w : 光源の見え目の大きさ

L_b : 背景輝度



出典 A.A.Kruithof: Tubular luminescence lamps for general illumination, Philips Technical Review, 6(1941), pp.65~96

図-9 色温度と照度の快適域

P : 光源の位置による影響の補正係数

a, b, c : 指数

各国で異なったグレアインデックスが使用されてきたが、CIEではUnified Glare Rating(UGR)式(4)で $a=2$, $b=c=1$ となる)を統一的な指標として、屋内照明ガイド¹¹⁾に個々の作業空間における最大UGRを示している。しかし、日本で市販されているオフィス照明用蛍光灯器具や、実際のオフィスの照明はほとんどUGR値がこのガイドラインを超えてしまうことが示されており¹³⁾、国内ではそのままガイドラインとして用いることはできない状態にある。

3.3 光色と照度

適正な照度は、視作業の内容によって異なるだけでなく、光色の影響も受ける。図-9はKruithof¹⁴⁾が示した、色温度と照度による快適域の図である。照明方式や気温、行動内容によって、快適域がややずれるという指摘はあるが、色温度が高いと高照度が好まれるという傾向は幾つかの研究で示されている^{15),16)}。

3.4 研究段階の指標

現在も快適指標に関する研究は、活発に行われている。必要照度についても“作業(視対象)”, “視力(年齢)”, “作業時間”, “姿勢”といったパラメータについて検討されている。また“明るさ感”, “不快グレア”, “不均一”, “順応”, “変動”, “生体リズムへの影響”に関する指標についても研究が進められている。しかし、主に特殊な装置を用いた実験や制御された実験室実験で研究されていることもあって、実空間に適用しようとしたとき、明確で簡便な測定が難しく、実際の設計や制御に利用されないままである。

おわりに

以上に述べた測定項目は、室内光環境測定に関する一部である。室内表面の透過率、反射率、透過および反射の拡散特性とスペクトル特性の測定なども視環境を形成するうえで重要である。また、昼光率、直射日光率、グローバル照度、全天空照度、直射日光照度などの測定も昼光関係についても述べたかったが、ここでは省略した。

光環境の測定に関して留意すべきことは、測光量がすでに人間の感覚(明所視での標準比視感度)を考慮したものであるということ、光には直進性(方向性)があり、室内において均一環境をつくるのが困難だということである。また、輝度差によって人はものを見る(認識する)のだから、均一輝度環境は考えられない。そのような環境下で眼球の動く速さを考えると、眼の定常状態をつくるのが難しいことになる。

また、測光量は便利だが、それだけでは視環境の評価として不十分である。スペクトル分布やさらには人間側のファクタを考慮した“はかり方”が求められる。

参考文献

- 1) 日本工業規格: JIS C 7613 測光標準用電球の測光方法(1985)
- 2) 日本工業規格: JIS C 1609 照度計(1993)
- 3) 日本工業規格: JIS Z 9110 照度基準(1979)
- 4) 中村 洋: 正射影カメラによる輝度および輝度分布の測定(その1)日本建築学会論文報告集第243号(1976)
- 5) 岩田利枝・塚見史郎: CCDカメラの光環境計測への応用技術, 照明学会誌, 81(1997), pp.246~249
- 6) B.Coutelier et al.: Luminous environment descriptors: proposals based on field observations, Lighting Research (2002) IEA Task 31 and CIE Division 3, Mini conference
- 7) 中村芳樹: 光環境における輝度の対比的定量的検討法, 照明学会誌, 84 8 A(2000), pp.522~528
- 8) 日本工業規格: JIS Z 8725 光源の分布温度及び色温度・相関色温度の測定方法(1999)
- 9) 日本工業規格: JIS Z 9112 蛍光ランプの光源色および演色性による区分(1990)
- 10) 日本工業規格: JIS Z 8726 光源の演色性評価方法(1990)
- 11) ISO 8995:2002(E) CIES 008/E 2001, Lighting of Indoor Work Places(2002)
- 12) C.Cuttle: Lighting patterns and the flow of light, Lighting Research and Technology, 3 (1971), pp.171~189
- 13) 岩田利枝: CIEグレア評価法UGRの研究調査委員会報告, 照明学会誌, 84 8 B(2000), pp.560~562
- 14) A.A.Kruithof: Tubular luminescence lamps for general illumination, Philips Technical Review, 6(1941), pp.65~96
- 15) 垣鏑 直ほか: 心理・生理反応から評価した好みの色温度と室温の組み合わせに関する実験的研究(その1), 日本建築学会計画系論文集, 第528号(2000), pp.67~73
- 16) 垣鏑 直ほか: 心理・生理反応から評価した好みの色温度と室温の組み合わせに関する実験的研究(その2), 日本

講座●はかる 計・測・量 (4)

建築学会計画系論文集, 第 532 号(2000), pp.87~92

(2003/9/29 原稿受理)



岩田利枝 いわたとしえ

生年月日 昭和 30 年 7 月 1 日/出身地 東京都/最

終学歴 早稲田大学大学院博士後期課程(建築学)/

学位 博士(工学)