光幕反射の定量的評価とその応用[†]

専門会員 金子 直礼*

1. はじめに

へやの中に輝度の高い照明器具や窓があって、紙や印刷物の表面上で作業者の視線方向に反射すると、視対象物の表面に光幕がかかったようになり、文字と背景との輝度対比が減少する。見えにくくなり、不快の原因となり、その状態が長く続けば疲労にもつながる。この現象は光幕反射(veiling reflection)と呼ばれる。

文字と背景との輝度対比は、(1)視対象物自体の反射特性(光沢が強いかわ弱いかわ)、(2)入射する光の方向性、(3)作業者が対象物を見る角度、の3要因によって決まるものであるから、照明技術・設備の側から入射する光の方向性をうまく制御できれば、たとえ光沢の強い文字や紙の対象物であっても、輝度対比をそれほど低下させずにすむことができる。

照明とその利用者が1対1の関係にある個室などの照明においては、照明器具が正反射の範囲にはいらないように位置を調整することができる。しかし、多数の人が執務する事務室、学校、図書館や、産業施設の組立て・検査などの全般照明では必ずしもこれができない。ここに光幕反射を軽減する照明のあり方を研究する意義がある。

歴史的にみると、1960年代より本格的に始められた光幕反射の研究は、主に次の二つの課題の解決をめざして進められてきたといえる。

- (1) 光幕反射の量(対象物の輝度対比の変化量)を物理的に定量化し、予測計算できるようにすること、
- (2) 定量化された光幕反射に対して、見え方や疲労、心理的印象などの面からの評価を行ない、設計指針などをつくること。

現在、(1)の光幕反射の定量化については、約束した標準の視対象物のCRF(Contrast Rendering Factorの略)により表現することではほぼ確立された。

(2)の評価方法と設計指針に関しては、ESI(Equivalent Sphere Illuminationの略、等価球内照度)による評価や、CRFの基準値などが作られた。今後、実用面からの検討や修正が国際的に活発にすすめられるものと思われる。

2. 光幕反射の定量化

光幕反射の強さは、視対象物の反射特性、室と照明の条件、観視条件など多くの要因に影響される(表1)。そこで、照明の良否が光幕反射に及ぼす効果を取り出して評価するために、一定の反射特性をもつ標準の視対象物に関する輝度対比の変化量、すなわちCRFで光幕反射の強さを表わす。

$$CRF = C / C_0 \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、C：実際の照明環境のもとでの標準の視対象物の輝度対比

C₀：標準の照明条件での標準の視対象物の輝度対比

表1 CRFに影響する要素

1. 環境条件	3. 見る側の条件
1-1 室の大きさと形	3-1 執務者の位置
1-2 室内面の反射率	3-2 視線の方向(東, 西, 南, 北)
	3-3 同上 (見おろす角)
	3-4 体の影
2. 視対象物	4. 照明器具
2-1 反射特性	4-1 照明器具の位置
	4-2 灯数
	4-3 配光曲線
	4-4 偏光の効果

現在のところCRFを予測計算するには、北米IESの方法¹⁾とCIE/TC-4.1(屋内照明技術委員会)による「屋内照明ガイド」改訂草案の方法²⁾がある。両者は、後述する標準の視対象物の決め方に違いがあるが、(1)式でCRFを定義するなど、基本の考え方は同じである。

2.1 標準の照明条件

標準の照明条件としては、半球面状のドームの内部が選ばれる。たとえば、ルーメンの測光に使われる球形光束形の中などであり、十分に拡散された光で満たされ、指向性のない空間を標準の照明条件とする。実際の照明環境で、光幕反射が強く生ずるほど輝度対比CはC₀より小さくなり、CRFはゼロに近づいていく。ドーム内面の輝度が視対象物の表面で反射して、作業者の視線方向にも反射するので、この標準の照明条件が理論上の輝度対比の最大値を与えるわけではない。したがってCRFが1.0以上になる

[†] Evaluation on Veiling Reflection and its Application to Lighting Design
* 東芝電材研究所 Tadahiro Kaneko

条件もある。

2.2 標準の視対象物

北米 IES は 1973 年に、白い紙の表面に書いた鉛筆のドットマークを視対象物の反射特性の標準に定めた¹⁾³⁾。これは、きわめて光沢の少ないトレーシング紙に、硬度 2 H 程度の鉛筆書きをした文字の反射特性に近い⁴⁾。文字部と背景部の輝度係数³⁾を 図 1 に示す。標準の照明条件での C_0 は 0.1675 である。

図 1 北米 IES の標準の視対象物の反射特性 (単位: $\text{cd}/\text{m}^2/\text{lx}$)
(a) 文字部分の輝度係数 $\beta_t(\theta, \varphi)$
(b) 背景部分の輝度係数 $\beta_b(\theta, \varphi)$

一方、CIE/TC-4.1 は、北欧で開発された別のものを標準として採用する意向である。これは、黒と白の視標からなり、黒はタイプライタ活字を、また白は紙の反射特性を代表したもので、セラミック基板を表面処理したものである²⁾。

図 2 CIE/TC-4.1 の推奨した標準の視対象物の反射特性
(a) 黒視標の輝度係数 $\beta_t(\theta, \varphi)$
(b) 白視標の輝度係数 $\beta_b(\theta, \varphi)$

図 2 に示すように、北米 IES の反射標準よりは光沢が強く、角度に応じた輝度係数の変化がかなり大きい。CIE/TC-4.1 が、図 2 の視対象物を採用することに積極的である理由は、ユーザが容易に入手し、実際の照明環境の測定に利用できることと、経年変化が少ないことにある。

2.3 視対象物を見る角度と体の影

作業者が視対象物を見る角度を統計的に調査した結果から、標準として垂直より 25° を定めている。また体の影によって視対象物に入射光が遮られる角度範囲を定め、計算対象から除くようにしている。

以上の約束のもとで、作業面のある一つの場所に対して一つの CRF 値を(2)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \text{CRF} &= C/C_0 \\ C &= (L_b - L_t)/L_b \\ L_t &= \int dE(\theta, \varphi) \beta_t(\theta, \varphi) \\ L_b &= \int dE(\theta, \varphi) \beta_b(\theta, \varphi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

L_t , L_b は標準の視対象物の文字部と背景部の輝度、 $dE(\theta, \varphi)$ は θ, φ 方向より入射する照度成分で、直射照度成分と間接照度成分からなる。一般の事務所照明条件においては、蛍光灯照明器具の長さが無視できないので、小さな光源エレメントに分割する。間接照度成分は、天井、壁を同様に小さな面素に分割し、各面素を大きさのある均一輝度面とみなして計算を進め、精度を高めるようにしている。

2.4 CRF の計算例

CRF の計算プログラムや計算例が、国内でも報告されている^{4)~6)}。一例として表 2 の結果がある⁴⁾。この照明および観測の条件は次のとおりである。

表 2 CRF の計算例⁴⁾

位置 (図 4)	光 沢 の 程 度			
	きわめて弱い		弱 い	強 い
	北米 IES の標準指標	20° 鏡面光沢度 1.3% トレーシング紙に鉛筆文字	20° 鏡面光沢度 3.1% 中質紙に鉛筆文字	20° 鏡面光沢度 15.2% アート紙 A に印刷文字
①	0.995	0.997	0.968	1.112
②	0.934	0.951	0.852	0.858
③	0.910	0.953	0.819	0.612
④	0.997	0.994	1.008	1.100
⑤	1.002	0.996	1.054	1.120
⑥	1.001	0.997	1.016	1.122

○照明条件：間口 12 m、奥行 10 m、天井高さ 2.6 m。

蛍光灯 40 W 2 灯用プリズムカバー付き器具 25 台による全般照明 (図 3 参照)。

○観測条件：図 3 の ①～⑥ の 6 箇所。器具列と平行方向に視対象を見る。

表 2 によれば、視対象の光沢の程度と見る位置によって CRF はかなり異なることがわかる。

位置でいえば、器具列直下の位置 ①、②、③のほうが、器具列中間の ④、⑤、⑥よりも相対的に CRF が低い。北米 IES の標準視標でいえば、位置 ③でもっとも対比が低下し (▲9%)、位置 ⑤でもっとも向上している。すなわち、器具列直下では観測者の前方にある照明器具が鏡面反

図3 照明器具とCRFの計算位置

射の位置にありCRFを低めている。器具列中間部では主たる光を左右からとるために高いCRFが得られている。

3. 光幕反射が見え方に及ぼす影響

3.1 ESIの考え方

1. で述べたように、光幕反射による輝度対比の減少が見え方に及ぼす影響を評価するために、1970年8月に北米IESはESI (Equivalent Sphere Illumination の略、等価球内照度、単位 (lx)) という評価量を使用することを勧告した³⁾。ESIの考え方は、

(1) 人間の目が知覚できる最小の輝度対比(輝度対比弁別いき)は、図4のように背景輝度が高くなるほど減少する。

図4 輝度対比弁別いき曲線とESIの考え方

(2) 十分に大きな対比をもつ視対象の見えやすさを、そのときの輝度対比弁別いきに対する倍率(北米IESではこれをVisibility(可視度)とよぶ)で表わすことができる。という二つの見え方の現象を利用している。

すなわち、背景輝度 L_0 のもとで、視対象の輝度対比が光幕反射のために C から C' に低下したとする。このときの輝度対比弁別いき (C_{t0}) に対する倍率 n は、

$$n = C' / C_{t0} \quad \text{.....(3)}$$

光幕反射のない状態であるなら、背景輝度が L_0 より低く、輝度対比弁別いきが C_{t0} よりも大きくなっても、倍率がちょうど n に等しくなる背景輝度が存在する。このときの背景輝度を L_e 、輝度対比弁別いきを C_{te} とすると、

$$n = C / C_{te} \quad \text{.....(4)}$$

L_e を実効背景輝度 (effective luminance) とよび、これを照度に変換したものがESIである。

すなわち、ESIは光幕反射のない照明条件下の照度であって、このときのいき値倍率(可視度, visibility)は光幕

反射の生じている照明条件とちょうど等しい。このようにして、光幕反射による対比低下が見え方に及ぼす効果を、これと等価な光幕反射のないときの照度変化に置換することができる。

図5 標準対比感度曲線とESIの求め方

実際にESIを求める手順としては、図5の輝度対比弁別いき曲線の逆数である標準対比感度曲線 (Standard Relative Contrast Sensitivity Curve) を用い(図5)、この曲線に沿ってESIを導出していくが、そのプロセスは、前述の図4の操作と数学的にも心理物理学的にも同じ内容になっている⁷⁾。

(1) 作業面の水平照度 E_t (lx)、標準の反射特性物体の背景輝度 L_t (cd/m²) を計算し、輝度係数 β を求める。

$$\beta = L_t / E_t \text{ (cd/m}^2\text{/lx)}$$

(2) 2.3に述べた方法によりCRFを計算する。

(3) L_t に対応するRCSにCRFを乗じ、光幕反射が生じているときの相対対比感度 RCS' を求める。

$$RCS' = RCS \times CRF$$

(4) RCS' に対応する実効背景輝度 L_e (cd/m²) を曲線を逆にたどって求める。

(5) L_e をESI (lx) に換算する。

$$ESI = L_e / \beta \text{ (lx)}$$

3.2 ESIの計算例

図6に、標準的な事務所の条件におけるESIの計算結

図6 ESIの計算例⁷⁾

果を従来の照度と比較して示す⁷⁾。照明器具列の直下の位置②，④，⑥では光幕反射が生じて，CRF が 0.946, 0.974, 0.986 と 1.0 よりも 2～5 %低下している。この状態を ESI 照度，すなわち，光幕反射のない標準の照明条件の照度に置き換えると，472, 751, 875 lx となり，上述の 2～5 %の輝度対比の低下が，照度の変化に置き換えると約90～250 lx になることを示している。一方，器具の中間位置では，正反射する照明器具がなく，左右からの光成分が支配的になるため，CRF が 1～3 %標準の照明条件よりも高くなる。このことは，見え方が標準状態よりも高いこと，照度を60～150 lx 高めたことと同じ効果があることを示している。

3.3 ESI の意義と問題点

ESI の新しい考え方の意義としては，
(1) 従来，個々別々にしか扱われなかった，④照度レベル，⑥視対象物の反射特性，③入射光の方向性の 3 要因を ESI という一つの総合評価量として扱えるようになったこと，
(2) 照明用電力の有効な利用の面から，照度レベルは従来のままであっても，光の指向性や照明器具の配置を適正化することにより，光幕反射を低くおさえ高い ESI が得られることがわかり，新しい照明器具や照明方式の開発を促したことを指摘することができる。一方，ESI に対して理論・実用面から，主に次のような問題点が指摘されている⁸⁾。
(1) RCS は照度とともに上昇を続ける。これは輝度対比弁別特性に基づいているからであって，現実の多くの視作業では飽和が起こったり，再び低下したりする。
(2) 高照度レベルでは，RCS を 95%から 96%に 1 %上昇させるために約 2,500 lx も照度を上げないといけない。一方，RCS を 50%から 51%に上げるには，わずかに 11 lx の上昇でよいことになるが，実用には少し特殊な評価ではないか。
(3) 室の場所や見る方向により ESI の変動が大きいので，その室の ESI の平均レベルをつかむことが難しく，異なる照明方式の間の比較ができない。
(4) 視対象物の標準として，一種類しか決めていないのは不足である。

以上のような立場から，照明の基準や勧告は従来の照度を用い，照明の質の基準の一つとして CRF (光幕反射)を用いようとする提案⁹⁾が，現在の欧州や CIE の動きを代表しているようである。

表 3 は，CIE/TC4-1 による CRF の基準²⁾である。

表 3 CRF の基準案 (CIE/TC-4.1)		
クラス	CRF	主たる用途
I	≥1.0	主として光沢の強い視作業のある事務室
II	≥0.9	光沢ある視作業を時々扱う所，一般事務室，学校
III	≥0.75	拡散性の視作業の所 学校およびある種の事務室

4. 光幕反射の軽減策

光幕反射を軽減する照明方式についてまとめてみると，次のようになるであろう。

(1) 間接照明方式

室内のどの位置でも，また見る方向にかかわらず高い CRF が得られる確実な方法と思われる。光沢の強い視作業を伴う事務室などの新しい方式として研究されている。

(2) 低輝度・大面積の照明器具

たとえば，蛍光灯 40 W 多灯用の間接照明器具などの使用によって，光幕反射を大幅に軽減できる。

(3) ツインビーム配光形照明器具

たとえば，学校の教室のように作業者の視方向がそろっているときは，ツインビーム配光形照明器具を視方向と平行になるように並べ，作業位置を器具列の中間にすると高い CRF が得られる。このことはすでに表 2，図 6 で確かめられた。ツインビーム配光は斜め入射光成分を増すので効果的である。

5. 今後の課題

光幕反射の定量化とその評価技術につき，主に欧米で開発されてきた CRF や ESI の考えを解説した。

3. で述べたように，ESI は物の見え方に及ぼす照度と，光幕反射による視対象物の輝度対比の変化を総合的に一つの尺度で評価しようとする試みである。このような照度と輝度対比をパラメータとした物の見え方に関する研究は，わが国でも諸先輩により体系的かつ豊富に蓄積されている。たとえば，文字の読みやすさの研究⁹⁾¹⁰⁾，明視照明のための標準等視力曲線の研究¹¹⁾，見やすさに基づく明視照明の研究¹²⁾などが，その代表的なものと思う。これらの豊富な研究成果と，光幕反射の定量的予測技術 (CRF など) を結びつけることによって，ESI 照度よりももっと現実的で，国際的にもすぐれた評価方法が，比較的容易に構築できるように思われる。今後の課題として考えるしだいである。

参考文献

(1) IES Technical Committee Report No. 5, The pre-determination of CRF for the calculation of ESI, J. Illum. Engng. Soc. 2-2 (1973) 149
(2) "Guide on interior lighting" Draft for discussion at the XX th CIE session 1983 Amsterdam
(3) 照明学会編，照明ハンドブック・第 9 章照明計算，p. 348 (昭53)
(4) 金子直礼：物の見え方の基礎問題，電気学会光応用・視覚研究会資料 LAV-82-43 (昭57)
(5) 大山 敬ほか：ESI 計算プログラムの開発，昭和51年度照明全国大会論文集，p. 58
(6) 笠間 勝ほか：新しい屋内照明評価法 (ESI 照度)，同上，p. 59
(7) Kaneko, T.: An alternative ESI system based on human visual acuity, J. Illum. Engng. Soc. 11-3

- (8) Boyce, P. R.: Is equivalent sphere illuminance the future?, Light. Res. Technol. 10-4 (1978) 179
- (9) 印東太郎, 河合 悟: 適正照度に関する心理学的実験, 照学誌 49-2 (昭40) 52
- (10) 河合 悟, 黒沢涼之助: 照度と読みやすさとの関係を表わ

す簡単な実験式, 照学誌 57-9 (昭48) 580

- (11) 中根芳一, 伊藤克三: 明視照明のための標準等視力曲線に関する研究, 建論報 229 (昭50) 101~109
- (12) 佐藤隆二, 伊藤克三, 大野治代: 見やすさに基づく明視照明に関する研究, 照学誌 64-10 (昭55) 541

(受付1985年8月9日)

新製品紹介

電球形蛍光ランプを使用したペンダント

東芝電材株式会社では、電球形蛍光ランプ「ネオボール」4灯のペンダント器具3機種を発売した。

「ネオボール」は、省電力、長寿命などの特長により店舗用、施設用として年々増加しているが、今回のペンダントは家庭の居間、食堂などの全般照明やカウンターライト用として幅広く使用できる。

<特長>

- (1) 「ネオボール」(クリヤメロウルック) 4灯を搭載しているので明るく、色鮮やか。

<仕様>

形 名	仕 様	価 格 (円)
BFP-4907	ネオボール G 177 クリヤメロウルック×4灯 トリム金色, 径φ 500 mm 高さ210 mm 重さ 3.6 kg	22,400
BFP-4908	トリム銅色, 同 上	22,400
BFP-4909	トリム銀色, 同 上	22,400

(問い合わせ先 東芝電材株式会社インテリア照明事業部)
〒105 東京都港区三田 1-4-28
電話 03-457-6081

- (2) セードは、アクリルのヘアライン仕上げで高級感を高めた。

- (3) 色(金、銀、銅)は、上セード、セードトリム、スイッチひもおよびつまみを同色化し、ファッション性を向上させた。

新製品紹介

収束形高効率ディスプレイライト 《オプトファイバ스코ープ》

松下電工株式会社では、このたびダイクール技術と光ファイバの光伝導技術を結集した器具《オプトファイバ스코ープ》を開発し発売した。

- (1) 商品などを直接照らす可視光を反射ミラー前方に反射し、不要な熱線(赤外線)は、ミラー後方へ80%透過。したがって熱線の少ないクールな光が実現できる。

- (2) ミニハロゲンランプ(12 V 50 W)の採用と、オプティカル反射ミラーとのコンビネーションで、コンパクトで、高演色、高効率である。さらに寿命末期まで光束減退がほとんどな

い。

- (3) 光の量は調光で、照射範囲はレンズ部分で変えられ、フレキシブルアームで光の方向が自在に変化できる。

- (4) 取り付けはスタンド付きで使用することができる。

以上のような特長を有し、店舗用や医療用にと用途は広い。

(問い合わせ先 松下電工株式会社電材事業本部 マーケティング部照明宣伝企画グループ)
〒571 大阪府門真市門真1048 電話 06-908-1609