

分光相互反射を考慮したタスク・アンビエント照明の演色性評価に関する研究

正会員 ○辰己紘樹*1 同 上谷芳昭*2

4.環境工学—6.光・色

演色性, 有彩色, 間接光, 相互反射, タスク・アンビエント照明

1. 研究の背景と目的

色の見えに影響する光源の性質に演色性がある。演色性評価には主に演色の忠実性を示す演色評価数が用いられるが、これは光源の分光分布から算出される。

しかしこの方法は間接光が考慮されていない。内壁が有彩色である場合には間接光の分光分布は直接光のものから変化し、物体色が見えが変化する。このため作業面に入射する光の下では色ずれが大きくなり、作業に支障が出る可能性がある。

本研究では可視光線を波長別に相互反射計算することで間接光も含めた作業面に入射する光の分光放射照度を求め、この光の演色評価数（以下「作業面演色評価数」）を算出する。

そしてアンビエント照明に対し、同等またはそれ以上の演色性を持つ光源をタスク照明としたタスク・アンビエント照明（TA 照明）によって全般照明よりも高演色な照明環境とすることができないかを検討する。

2. 波長別相互反射を考慮した分光分布の算出方法

2.1 光源の分光放射束の算出

光源 L_k ($k=1\sim m$) の波長 λ ($380\text{nm} < \lambda < 780\text{nm}$) における相対分光分布を $S_k(\lambda)$ 、光源 L_k の分光放射束の最大値を X_k とすると、分光放射束 $\Phi_{e,k}(\lambda)$ [W/nm] は以下の式(2-1)で表される。

$$\Phi_{e,k}(\lambda) = X_k S_k(\lambda) \quad (2-1)$$

なお光源 L_k の全光束を Φ_k [lm]、 K_m を最大視感度 (683lm/W)、 $V(\lambda)$ を明所標準比視感度とすると X_k は式(2-2)で得られる。

$$X_k = \frac{\Phi_k}{K_m \int_{380}^{780} S_k(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (2-2)$$

2.2 分光放射照度の算出

2.2.1 分光放射直接照度の算出

光源が一つの場合や同種の光源を使用する場合、光

源の分光放射束と作業面における分光放射直接照度の相対分光分布は等しい。よって作業面における直接照度を $E_a[\text{lx}]$ とすると、分光放射直接照度 $E_{ed}(\lambda)$ [$\text{W/m}^2/\text{nm}$] は以下の式(2-3)より得られる。

$$E_{ed}(\lambda) = Y(\lambda) E_d \quad (2-3)$$

$Y(\lambda)$ は光源の分光分布特性によって決まる、全光束（直接照度）を分光放射束（分光放射直接照度）に変換する補正值である。この値は 1 節の Φ_k と $\Phi_{e,k}(\lambda)$ を用いて以下の式(2-4)より得られる。

$$Y(\lambda) = \frac{\Phi_{e,k}(\lambda)}{\Phi_k} \quad (2-4)$$

2.2.2 分光放射照度の算出

光束伝達計算法を応用し、分光放射直接照度および室の形状、内壁の分光反射率から波長別相互反射計算により分光放射間接照度も含めた分光放射照度を求める。以下に方法を示す。

図 2.1 に示すような放射輝度分布が一様で均等拡散性の面 S_1 の分光放射束発散度が 1 のとき、これに向き合った面 S_2 上の 1 点 P の分光放射照度 $E_{e,2}(\lambda)$ は以下の式(2-5)で表される。

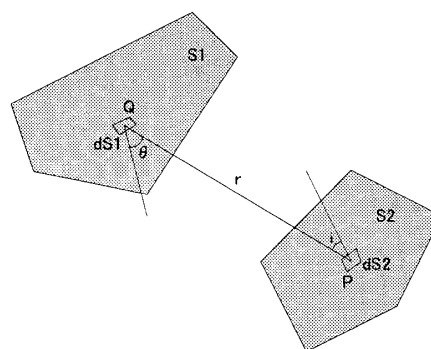


図 2.1 均等拡散面の分光放射束伝達

$$E_{e,2}(\lambda) = \int_{S_1} \frac{\cos\theta\cos\phi}{\pi r^2} dS_1 \quad (2-5)$$

$E_{e,2}(\lambda)$ を面 S_2 上で積分すれば面 S_1 から出て面 S_2 に直射入射する分光放射束 $g_e(\lambda)$ が得られる。

$$g_e(\lambda) = \int_{S_2} \int_{S_1} \frac{\cos\theta \cos i}{\pi r^2} dS_1 dS_2 \quad (2-6)$$

$g_e(\lambda)$ を S_1 で割ったものが面 S_2 が分光放射束発散度1のときの面 S_1 上の平均分光放射照度であり、 $f_{e,12}(\lambda)$ とすれば以下の式(2-7)で表される。

$$f_{e,12}(\lambda) = \frac{g(\lambda)}{S_1} = \frac{1}{S_1} \int_{S_2} \int_{S_1} \frac{\cos\theta \cos i}{\pi r^2} dS_1 dS_2 \quad (2-7)$$

閉面を均等な n 個に分割し、面 i へ入射する分光放射束を $\Phi_{e,i}(\lambda)$ 、光源から直接受ける分光放射束を $\Phi_{e,di}(\lambda)$ とすれば、 $\Phi_{e,i}(\lambda)$ は式(2-8)で表される。

$$\Phi_{e,i}(\lambda) = \Phi_{ed,i}(\lambda) + \sum_{j=1}^n \rho_j(\lambda) f_{e,ji}(\lambda) \Phi_{e,j}(\lambda) \quad (2-8)$$

ここで $\rho_j(\lambda)$ は i 面に向き合う他の面 j のそれぞれの分光平均反射率、 $\Phi_{e,j}(\lambda)$ は面 j それぞれの入射全分光放射束、 $f_{e,ji}(\lambda)$ は j 面から i 面への固有分光放射束分布係数である。

なお分光放射照度で表したものが式(2-9)である。

$$E_{e,i}(\lambda) = E_{ed,i}(\lambda) + \sum_{j=1}^n \rho_j(\lambda) f_{e,ij}(\lambda) E_{e,j}(\lambda) \quad (2-9)$$

3. 演色性・調光率・消費エネルギーの算出方法

3.1 作業面演色評価数の算出

本研究にて演色性評価の指標とする作業面演色評価数は作業面に入射する光の演色性の評価方法である。演色評価数の計算方法¹⁾において基準の光はそのままに、光源の分光分布を作業面に入射する光の分光分布に置き換えることで計算できる。

3.2 作業面照度と調光率の算出

3.2.1 直接照度の算出

照明器具の大きさが受照点までの距離の $1/5$ 以下であれば点光源として計算する。そうでない場合、光源を適当な n 個に分割し、主要寸法が距離の $1/5$ 以下である全光束が $1/n$ の n 個の光源の集合とみなす。 θ を作業面の受照点と光源の両端それぞれを結ぶ2つのベクトルが成す角度、 $\Delta\theta$ を光源の主要寸法が受照点までの距離の $1/5$ である場合の2つのベクトルが成す角度($\Delta\theta \approx 0.19934$)とすると最小となる n は式(3-1)で算出される。

$$n = \text{INT}\left(\frac{\theta}{\Delta\theta}\right) + 1 \quad (3-1)$$

点光源 L_k を分割した分割光源 L_{kl} ($l=1 \sim n$) による

直接照度の合計がその光源による直接照度 $E_k[\text{lx}]$ であり、 $r_{kl}[\text{m}]$ を分割光源 L_{kl} から作業面までの距離、 α_{kl} を入射角、 $I_{kl}[\text{cd}]$ を分割光源 L_{kl} の作業面方向の光度とすると式(3-2)より得られる。

$$E_k = \sum_{k=1}^n \frac{I_{kl} \cos \alpha_{kl}}{r_{kl}^2} \quad (3-2)$$

3.2.2 照度(全照度)の算出

直接照度から光束伝達計算法により求める。

3.2.3 調光率の算出

定格出力の光源による作業面照度を設定照度に一致させるために調光を行う。調光率 x は E を定格時の全照度、 E_0 を設定照度とすると式(3-3)より求められる。なお調光率は光源の定格時の光束に対する調光時の光束の比率を指すものとし、調光による相対分光分布の変化は無いものとする。

$$x = \frac{E}{E_0} \quad (3-3)$$

3.3 消費エネルギーの算出および比較

調光に対応した照明器具の調光率と消費電力(定格時の消費電力に対する各調光率の消費電力の比率)の関係の一例を図3.1に示す。

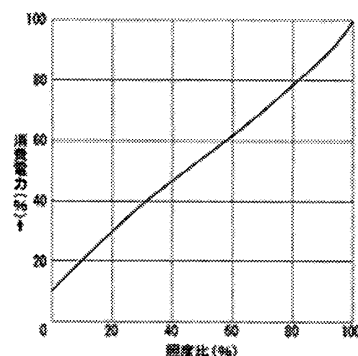


図 3.1 調光率と消費電力の関係

このグラフより消費電力 $y[\%]$ と照度比 $x[\%]$ (調光率)の関係を線形近似し、光源 L_k の定格消費電力を $P_{0,k}[\text{W}]$ 、調光率を $x_k[\%]$ とすると実際の消費電力 $P_k[\text{W}]$ は式(3-4)で表される。

$$P_k = (0.9x_k + 10) \cdot P_{0,k} \quad (3-4)$$

全光源の消費電力の和を消費エネルギーとする。

4. 混光の特性の算出および評価

4.1 各種条件の設定

4.1.1 室形状および什器の配置

室は一辺 3.0m の立方体とする。平面図を図4.1に、机上のタスク照明の配置を図4.2に示す。観

測点(図 4.1 の星印)はタスク照明の直下である。

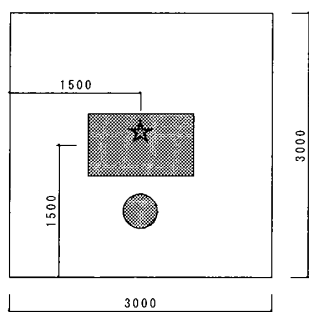


図 4.1 平面図および断面図

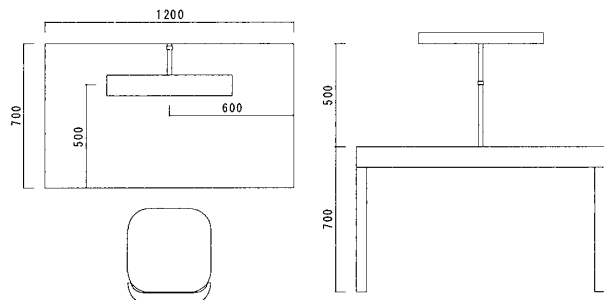


図 4.2 デスクとタスク照明の寸法および配置

4.1.2 内壁の分光反射率および視感反射率

壁、天井、床（以下内壁）は全て同色とし、Macbeth Color Checker の色票から orange（視感反射率 29.33%）、bluish green（42.73%）、yellow green（43.66%）、yellow（59.64%）を選択した。これらの分光反射率を図 4.3 に示す。

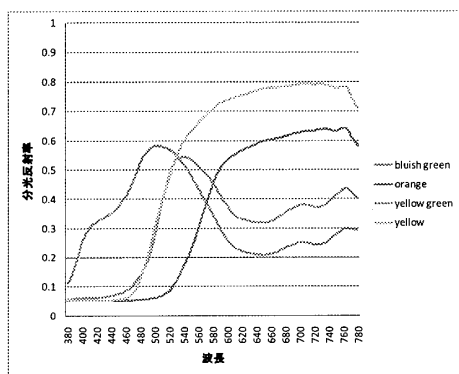


図 4.3 使用する色票の分光反射率

4.1.3 光源の演色性等の特性

アンビエント照明は 1 種類、タスク照明は 3 種類とした。照明器具の詳細を図 4.4～図 4.7 に示す。

4.1.4 照明の各種基準の設定

設定照度は、JIS²⁾の照明基準のうち事務所の執務室を想定し 750lx とした。またタスク・アンビエント比（TA 比）は 2、1、0 とした。この際のタスク、アンビエント両照度を表 4.1 に示す。

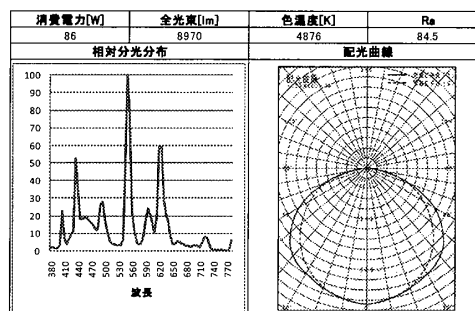


図 4.4 アンビエント照明の詳細

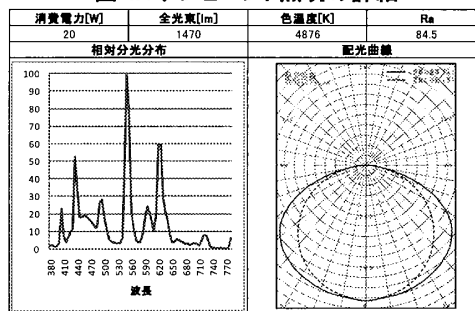


図 4.5 タスク照明(三波長型蛍光灯)の詳細

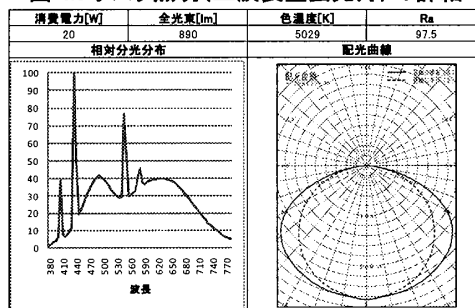


図 4.6 タスク照明(高演色性蛍光灯)の詳細

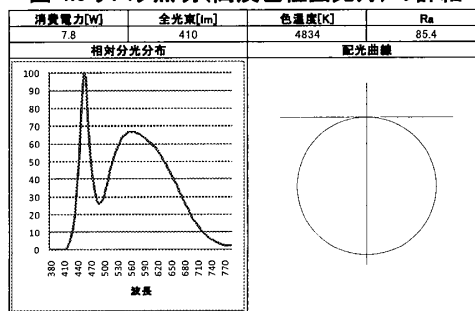


図 4.7 タスク照明(LED)の詳細

表 4.1 タスク、アンビエント両照度の設定

TA比	タスク照度[lx]	アンビエント照度[lx]	全照度[lx]
2	500	250	750
1	375	375	750
0	0	750	750

演色性に関しては JIS²⁾における平均演色評価数 Ra の基準が 80 以上であるから、平均作業面演色評価数 Ra'も基準値を 80 とする。

4.2 照明器具の設定

4.2.1 アンビエント照明

内壁の色に関わらず、設定照度 250lx および 375lx では 1 台、照度 750lx では 2 台設置した。

この際の照明器具の配置を以下の図 4.8 に示す。

またこの配置におけるアンビエント照明の照明器具の調光率を表 4.2 に示す。

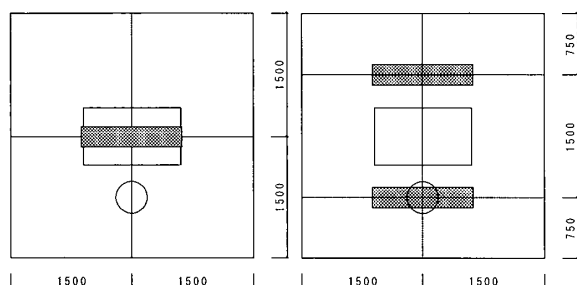


図 4.8 台数別の照明器具の配置
表 4.2 アンビエント照明の調光率

設定照度 (lx)		250	375	750
視感反射率 (%)	色	1台		2台
	色			
29.33	orange	50.8%	76.2%	90.6%
42.73	bluish green	45.7%	68.5%	80.6%
43.66	yellow green	45.3%	68.0%	79.8%
59.64	yellow	38.2%	57.3%	65.4%

4.2.2 タスク照明

それぞれのタスク照明を配置した際の調光率を以下の表 4.3 に示す。

表 4.3 各タスク照明の調光率

三波長		高演色		LED	
視感反射率 (%)	設定照度 (lx)	500	375	500	375
	色				
29.33	orange	37.0%	27.7%	61.1%	45.8%
42.73	bluish green	36.3%	27.3%	60.0%	45.0%
43.66	yellow green	36.3%	27.2%	60.0%	45.0%
59.64	yellow	35.4%	26.5%	58.4%	43.8%
視感反射率 (%)	設定照度 (lx)	500	375	500	375
	色				
29.33	orange	93.7%	70.3%	92.6%	69.5%
42.73	bluish green	92.6%	69.5%	92.5%	69.4%
43.66	yellow green	92.5%	69.4%	91.0%	68.3%
59.64	yellow	91.0%	68.3%		

4.3 混光の作業面演色評価数の算出

この調光率にて各照明器具を使用した際の混光の分光放射照度分布を算出し、Ra'を求めた。内壁色、タスク照明、TA 比それぞれの条件における混光の Ra'を表 4.4 に示す。

4.4 消費電力の算出

各条件における消費電力および全般照明の消費電力を基準とした際の電力削減率を表 4.5 に示す。

表 4.4 混光の平均作業面演色評価数

内壁色		orange (5YR 6.0/11.0)				bluish green (2.5BG 7.0/6.0)			
タスク照明	タスク照度	なし	3波長	高演色	LED	なし	3波長	高演色	LED
		0	375	500	375	500	375	500	375
TA比		0	1	2	1	2	1	2	1
Ra'		77.1	78.2	80.4	83.1	87.1	85.9	89.3	
内壁色		yellow green (5GY 7.1/9.1)				yellow (5Y 8.0/11.1)			
タスク照明	タスク照度	なし	3波長	高演色	LED	なし	3波長	高演色	LED
		0	375	500	375	500	375	500	375
TA比		0	1	2	1	2	1	2	1
Ra'		78.8	79.6	80.8	87.2	91.0	81.6	82.9	
内壁色		yellow green (5GY 7.1/9.1)				yellow (5Y 8.0/11.1)			
タスク照明	タスク照度	なし	3波長	高演色	LED	なし	3波長	高演色	LED
		0	375	500	375	500	375	500	375
TA比		0	1	2	1	2	1	2	1
Ra'		72.1	74.8	77.7	80.1	85.0	82.2	86.6	

表 4.5 各条件における消費電力および削減率

内壁の色		orange				bluish green			
タスク照明	タスク照度	なし	3波長	高演色	LED	なし	3波長	高演色	LED
		0	375	500	375	500	375	500	375
消費電力[W]		156	71.0	51.1	74.7	55.9	71.0	51.0	
電力削減率		0.0%	54.4%	67.2%	52.1%	64.1%	54.4%	67.3%	
内壁の色		yellow green				yellow			
タスク照明	タスク照度	なし	3波長	高演色	LED	なし	3波長	高演色	LED
		0	375	500	375	500	375	500	375
消費電力[W]		137	63.9	46.2	67.4	51.0	63.9	46.2	
電力削減率		0.0%	53.5%	66.3%	50.9%	62.9%	53.5%	66.4%	
内壁の色		yellow				yellow			
タスク照明	タスク照度	なし	3波長	高演色	LED	なし	3波長	高演色	LED
		0	375	500	375	500	375	500	375
消費電力[W]		112	54.5	39.9	58.0	44.5	54.6	39.9	
電力削減率		0.0%	51.5%	64.5%	48.4%	60.4%	51.5%	64.5%	

5. 結論

本研究では以下の知見を得た。

- ・有彩色空間では作業面演色評価数は、使用する光源の演色評価数よりも小さくなる場合がある。
- ・TA 照明は全般照明と比べ演色性を改善することができる。また TA 比が大きいほどその改善の度合いは大きい。
- ・作業面の演色性に関して、タスク照明に最も適しているのは高演色性蛍光灯であり、また同程度の演色評価数を持つ光源ながら、LED は三波長型蛍光灯に比べより高い評価性を示した。
- ・消費電力に関しては高演色性蛍光灯に比べ三波長型蛍光灯または LED をタスク照明として使用するほうがより小さくすることができた。

謝辞 本研究は科学研究費補助金（課題番号：20560548）による。

参考文献

- 1) 日本工業規格, 光源の演色性評価方法, JIS Z 8726, 1990
- 2) 日本工業規格, 屋内作業場の照明基準, JIS Z 9125, 2007

*1 京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻修士課程

*2 京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻 准教授 工博

Graduate student, Kyoto University

Assoc. Prof., Kyoto University, Dr. Eng