

# Improvement of Illuminance and Color Temperature Providing Performance in Intelligent Lighting System Using Cut-Off Luminaire with Narrow Luminous Intensity Distribution

Ryoto TOMIOKA<sup>\*</sup>, Mitsunori MIKI<sup>\*\*</sup>, Shota MURANO<sup>\*\*\*</sup>

(Received April 20, 2018)

We proposed an Intelligent Lighting System (ILS) that provides required illuminance and correlated color temperature (CCT) to each user, and introduced this system into actual offices. From demonstration experiments in actual offices in Japan, we reported that suitable lighting environment including illuminance and CCT differs according to the person and the type of work in which the officer is engaged. In the ILS, we generally mount non cut-off baselight with wide luminous intensity distribution on the ceiling at general intervals of 1.8 m. However, in such a installation method, the system cannot provide the required illuminance and CCT to each user in the case that two users working near-by desire far different illuminance and CCT. This is caused by wide luminous intensity distribution of luminaire and the relations between the luminaire installation layout and the office layout. This study was made to improve illuminance and CCT providing performance of ILS by changing luminaire's luminous intensity distribution and setting intervals. This research contributes to the widespread use of intelligent lighting systems.

**Key words :** Intelligent Lighting System, office, system performance evaluation

**キーワード :** 知的照明システム, オフィス, システム性能評価

## 配光角が狭いカットオフ照明を用いた 知的照明システムにおける照度・色温度提供精度の向上

富岡 亮登, 三木 光範, 村野 翔太

### 1. 序論

近年、オフィス環境が執務者に及ぼす影響についての研究が広く行われており、オフィス環境を改善することが、執務者の知的生産性の向上につながると報告

されている<sup>1)</sup>。特にオフィス環境の中でも、光環境に着目した研究では、個々の執務者に対し、執務に最適な明るさ(照度)および色温度を提供することがオフィス環境の改善に有効であることされている<sup>2)</sup>。また、

<sup>\*</sup> Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto  
Telephone:+81-06-6321-6952, Fax:+81-06-6321-6952, E-mail:rtomioka@mikilab.doshisha.ac.jp

<sup>\*\*</sup> Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto  
Telephone:+81-774-65-6930, Fax:+81-774-65-6716, E-mail:mmiki@mail.doshisha.ac.jp

<sup>\*\*\*</sup> Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto  
E-mail:smurano@mikilab.doshisha.ac.jp

オフィスビルの増加により、オフィスビルでのエネルギー消費量は年々増加傾向にあり、問題となっている。オフィスビルにおける全エネルギー消費量のうち、約25%を照明が占めている<sup>3)</sup>。したがって、オフィス照明の省電力化が、オフィス全体のエネルギー消費量の削減につながる。

そこで著者らは、オフィス環境において、執務者の知的生産性の向上と消費電力の削減を目標として、最小限の電力で、各執務者が要求する照度および色温度を個別に提供する知的照明システムの研究を行っている<sup>4-6)</sup>。実用化に向けた実証実験として、この執務者が希望する照度および色温度を提供する知的照明システムのプロトタイプを複数のオフィスに導入した。実証実験の結果、大半の執務者がJIS基準の700 lxよりも低い照度を要求し、さらに約半数の執務者はIES recommended light levels: Normal work spaceの500 lxよりも低い照度を要求した。また、照明の消費電力においては、知的照明システム導入前の通常の照明環境と比べ、40%程度の削減効果が得られた<sup>7)</sup>。

実証実験を行ったオフィスを含め、従来のオフィスの執務エリアではフロア全体に一律な照度を提供するため、広い配光を持つベースライトを利用する。このような環境に知的照明システムを導入した場合、照明1灯あたりが照度を与える範囲が広いため、隣り合う執務者が大きく異なる照度または色温度を要求した場合に同時に執務者が希望する照度・色温度を提供できない問題が生じる。

そこで本研究では、照明の光の広がり方である配光角を変更することにより知的照明システムの照度・色温度の提供精度を向上させることを目指す。そこで、本研究では一般的なオフィス環境において、知的照明システムが消費電力を削減しつつも最も高い精度で照度・色温度を提供できる照明環境を検証する実験を行った。照明の配光角と設置間隔を変更した種々の照明環境下において、オフィス内の各執務者にどの程度の精度で照度・色温度が提供できているかを個別照度提供精度および個別色温度提供精度という指標を用いることで評価した。これと同時に、知的照明システムの省電力性とのバランスも考察するため、照明環境の

違いによる消費電力量についても検証した。知的照明システムに使用する照明環境を見直すことで、省電力性を保持しつつも高い精度で照度・色温度を個々の執務者に提供できる知的照明システムの構築を目指す。

## 2. 知的照明システム

### 2.1 知的照明システムの概要

知的照明システムは調光・調色が可能なオフィスの天井照明を個別に制御し、照明の明るさ・色温度を変化させることにより、各執務者が要求する照度および色温度を個別に、最小の消費電力で任意の場所に提供するシステムである。知的照明システムでは照明の明るさの指標として、鉛直下方向の光度を用いる。以降、本研究では照明の光度は鉛直下方向の光度のことを指す。また、色温度の指標としては相関色温度を用いるが、本論文では色温度と表記する。

知的照明システムの構成をFig. 1に示す。知的照明システムは、複数の調光・調色可能な照明器具、照明制御装置、執務者の机上面の照度・色温度を測定する複数の色彩照度計、電力計を一つのネットワークに接続して構成する。照明制御装置は、執務者が予め設定した要求照度（以降、目標照度）および要求色温度（以後、目標色温度）の情報、各照度センサから取得する机上面の照度・色温度情報、および電力系の電力情報を用いて現在の照明の点灯パターンの有効性を評価する。点灯パターンの評価の後、各執務者の目標照度・目標色温度を満たせるように照明の明るさおよび

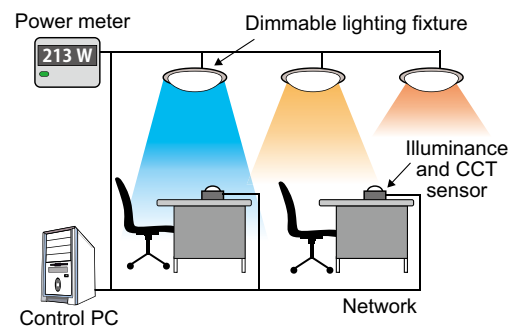


Fig. 1. Constitution of ILS. Luminosity and CCT of lighting fixture are independently changeable.

色温度に微小な変更を加え、変更後の点灯パターンを再び評価し、評価結果を比較することにより、変更後の照明の明るさを採用するかを決定する。これを知的照明システムの制御の1ステップとする。このステップを数秒ごとに繰り返すことにより、各執務者の目標照度・目標色温度を省電力で実現する照明点灯パターンを実現する。なお、目標照度は、知的照明システムの動作中でも、ユーザインターフェイスを通じて随時変更が可能である。

知的照明システムにおける照明制御は、各執務者の目標照度・目標色温度を実現することと、消費電力の最小化の2つを目的とした最適化問題として捉える。制御アルゴリズムには、大域的最適化問題のアルゴリズムである Simulated Annealing (SA) を基礎とし、回帰係数によって近傍設計を行う手法を組み込んだ適応的近傍アルゴリズム<sup>6)</sup>や、高速に照明制御を行うための数理計画法を用いたアルゴリズム<sup>7)</sup>を用いることができる。本稿では、基礎的な知的照明システムを用いて個別照度・色温度提供精度の検証を行うため、SAを用いた適応的近傍アルゴリズムを用いた。

## 2.2 知的照明システムに一般的な照明灯具を用いた場合の問題点

通常のオフィス照明は、部屋全体を均一に照らすように設計されている。このため、オフィスでは一般的に、配光角が広く、光源からの光束を遮る反射板を持たないノンカットオフ型のベースライトが採用される。ベースライトを用いて知的照明システムを構成した場合、1台の照明器具が照度を提供する範囲が広範囲となる。そのため知的照明システムの照明制御アルゴリズムに基づいて点灯パターンの最適化を行っても、すべての執務者の目標照度および目標色温度を実現できない場合がある。

オフィスの執務エリアには Fig. 2 に示すような対向島型レイアウトが広く用いられる。例えば、日本のオフィスでは一般的に 120 cm × 70 cm のデスクが用いられる。また、標準的なオフィスの天井高は 2.6 m であり、床からデスクの作業面までの高さは、JIS で推奨されている 0.75 m が広く採用される。これらの標準規格から、照明器具と作業面の鉛直方向の距離

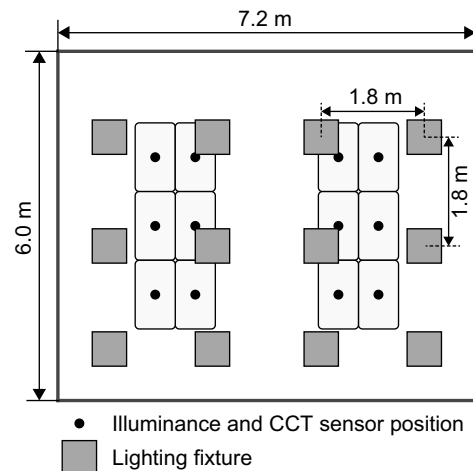


Fig. 2. Floor plan view of standard small office environment with baselight installed at interval of 1.8m.

を 1.85 m と考えると、配光角の指標のひとつである 1/2 照度角が 110° 程度の標準的な照明器具では、鉛直下方向の照度の 1/2 の照度が得られる範囲が、直径約 4 m となる。このような照明環境とデスクレイアウトが、知的照明システムの個別照度・色温度提供精度が悪化する要因となっている。

## 3. 知的照明システムにおける個別照度および個別色温度提供精度の定式化

通常のオフィス照明と異なる配光角を使用し、知的照明システムの照度・色温度提供精度を向上させるために、知的照明システムを動作させた際の照度および色温度の提供精度を定式化する必要がある。照度と相関色温度は別の指標であるため、ここでは式 (1) に示す照度平均誤差率および式 (2) に示す色温度平均誤差率の2つの指標を定義し、各執務者に提供される照度・色温度の誤差範囲を定量化する。

照度平均誤差率は各執務者の目標照度と知的照明システムによってその執務位置に実際に提供される照度の誤差を平均したものである。人間の視覚特性上、5% 未満の明るさの変動は知覚することができないため、本稿では目標照度 ±5% の照度差は許容誤差範囲として設定した<sup>8)</sup>。そのため照度平均誤差率を算出する際にもこの範囲内の誤差は計算に含めないこととした。

相関色温度の単位であるケルビン (K) は人間の色温度に対する知覚量と線形な関係を持たない。そこで、色温度平均誤差率の算出にはケルビンではなく、その逆数である逆色温度、ミレッド (M) を用いた。ミレッドはその数値の差と色の違いが一致する単位量である。このため、ミレッドを用いて算出した色温度平均誤差率はどの目標色温度に対しても色の違いの大きさを誤差として捉えた指標とみなすことができる。また、ミレッドを用いた色温度指標において  $\pm 5$  M 程度の色温度差は知覚できないため、目標色温度と提供色温度の色温度差の誤差範囲を  $\pm 5$  M として色温度平均誤差率を算出する<sup>9)</sup>。

$$E_L = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{Le_j}{Lt_j} \times 100 \quad (1)$$

$$Le_j = \begin{cases} 0 & Lt_j \leq Lc_j \leq Lt_j + La \\ Lt_j - Lc_j & Lc_j \leq Lt_j \\ Lt_j + La - Lc_j & Lc_j > Lt_j + La \end{cases}$$

$$E_T = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{Te_j}{Tt_j} \times 100 \quad (2)$$

$$Te_j = \begin{cases} 0 & Tt_j \leq Tc_j \leq Tt_j + Ta \\ Tt_j - Tc_j & Tc_j \leq Tt_j \\ Tt_j + Ta - Tc_j & Tc_j > Tt_j + Ta \end{cases}$$

$E_L$ : Average difference rate between target and actual illuminance [%],

$E_T$ : Average difference rate between target and actual CCT [%],

$n$ : Number of sensor,

$Lc$ : Provided illuminance [lx],  $Lt$ : Target illuminance [lx],  $La$ : Allowance of illuminance error [lx],

$Tc$ : Provided CCT [M],  $Tt$ : Target CCT [M],

$Ta$ : Allowance of CCT error [M]

#### 4. 照明の配光角と設置間隔を変更した場合の個別照度・色温度提供精度の検証

##### 4.1 実験概要

省電力性を保持しつつ、照度・色温度提供精度が高くなる照明環境を検証するため異なる照明配光角を持つ複数の照明を用いて知的照明システムを動作させ照度平均誤差率および色温度平均誤差率を算出する実験を行った。

実験は Fig. 2 に示す 12 席の執務机がある小規模オフィス環境において 12 人の執務者が執務を行う状況を想定して行った。それぞれの執務者は目標照度を 300 lx, 500 lx, 700 lx からランダムに、目標色温度を 3000 K から 5500 K まで 500 K 刻みでランダムにそれぞれ設定する。これらの目標照度・目標色温度は実際のオフィスにて行った知的照明システムの実証実験で執務者が希望した照度・色温度の最小値から最大値をカバーするため、実際のオフィスを想定した設定値である。

配光角の条件を変更するため、照明には Table 1 に示した種々の配光角を持つ照明器具を用いた。このうち、Middle 照明と Narrow 照明は配光角を狭くするた



Fig. 3. Cut-off downlight with narrow luminous intensity distribution of 49° (left). The experiment room in which the cut-off downlights are installed at interval of 0.6 m (right).

Table 1. Lighting fixtures used in the experiment.

	1/2 Beam Angle [deg]	Flux [lm]	Type	Product Num.	Manufacture
Wide	110	3430	Baselight	EL-G6004MM	Panasonic
Middle	49	2220	Downlight	EL-D2023	Panasonic
Narrow	26	1300	Downlight	LZD-91820	DAIKO ELECTRIC

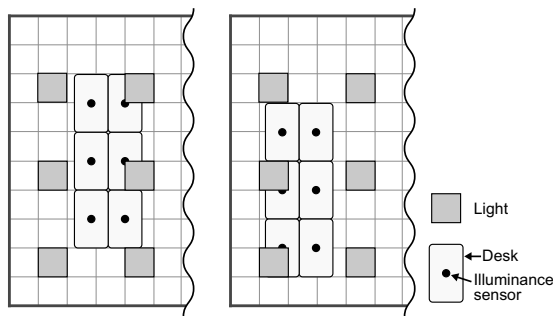


Fig. 4. Different relative positions between lighting fixtures and desks in the floor plan view.

めの反射板がついたダウンライト型照明である。Fig. 3に示す照明灯具は Middle 照明である。

また、天井への照明の均等な設置間隔は、0.6 m 間隔のグリッド天井システムへの設置を想定し、0.6 m, 1.2 m, 1.8 m の均等な配置間隔とした。Fig. 2の照明レイアウトは、1.8 m 間隔で照明を設置した際の一例である。照明の設置間隔が広い場合、照明とデスクの相対位置関係が、照度・色温度提供精度に影響を与えるため、照明に対してデスクを 0.6 m 間隔で照明をずらし、照明とデスクの全ての相対位置関係のもとで実験を行った。Fig. 4に異なる相対位置関係を2例示す。照度・色温度提供精度は、上記の各照明条件でランダムに目標照度・色温度を設定して 100 回の試行を行い、その平均値として算出した。

#### 4.2 実験結果と考察

Fig. 5にそれぞれの照明環境における照度平均誤差率を、Fig. 6に色温度平均誤差率を示す。各データの最大値は、前節で述べた 100 通りの目標照度・色温度分布のうち、目標照度と提供照度の差および目標色温度と提供色温度の差が最も大きかったデータの値を示す。なお、中角配光を持つ照明 (Middle) および狭角配光を持つ照明 (Narrow) を 1.8 m 間隔で均等に設置した場合、レイアウト条件によっては照明によって照度が提供できない位置が存在する。したがってこれらの条件は適切でないと判断し、結果から除外した。各照明の配光角および設置間隔と照度平均誤差率および色温度平均誤差率の関係は同傾向を示すことが明らか

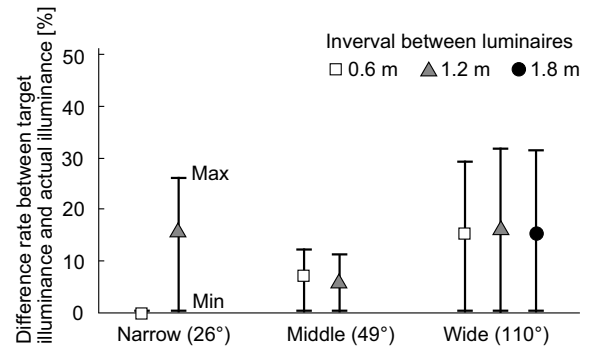


Fig. 5. Difference rate of target and provided illuminance yielded by the experiment.

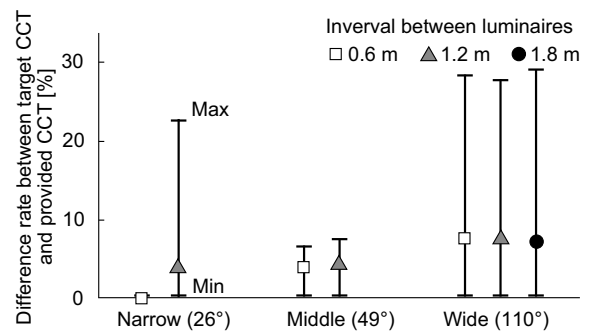


Fig. 6. Difference rate of target and provided CCT yielded by the experiment.

かとなった。

照度平均誤差率を下げることを目的に、110度の配光を持つ Wide 照明の設置間隔を 1.8 m よりも小さくしても、平均誤差率に変化はみられなかった。Wide 照明、Middle 照明の照度平均誤差率および色温度誤差率をみると、設置間隔を変更してもそれぞれの平均値に変化はみられないため、照度・色温度平均誤差率に影響を及ぼす照明環境の要因は配光角のみであることが明らかになった。検証条件の中で、最もよい平均誤差率を示したのは、26度の配光を持つ Narrow 照明を 0.6 m 間隔で設置した環境であった。このときの平均照度誤差率は 0.3% となった。しかし、人間の照度知覚特性を考えると、5% 程度の照度差は誤差の範囲内であるため照明を 1.2 m 間隔で設置することができる Middle 照明が最も優れた照明環境であるといえる。Table 2に、上記と同じ実験環境において算出した消費電力値を示す。消費電力値の観点からも Narrow 照明を 0.6 m 間隔で設置する場合に比べ Middle 照明を

Table 2. Power consumption in the experiment.

Light (Angle)	Power consumption[W]		
	60 cm	120 cm	180 cm
Wide (110°)	637	550	578
Middle (49°)	130	87	-
Narrow (26°)	204	-	-

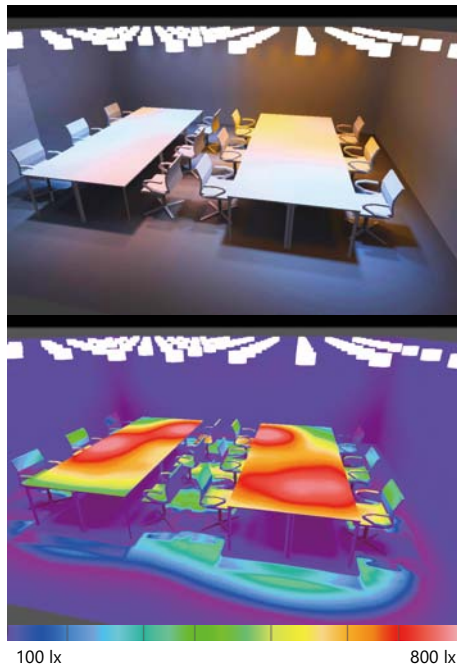


Fig. 7. An example of simulation rendering (Top) and illuminance distribution map (Bottom).

1.2 m 間隔で設置する場合は電力効率が良いと結論付けられる。これらの結果から、対向島型レイアウトを採用する一般的なオフィス環境において人間の知覚誤差内で照度・色温度を各執務者に提供でき、なおかつ省電力性が最も高くなる照明環境は 1/2 照度角が 49° 程度のカットオフダウンライトを 1.2 m 間隔で設置した環境であると結論付ける。

Fig. 7 に Middle 照明を 0.6 m 間隔で設置した際のシミュレーション例を示す。下の画像に示す照度分布を見ると、1つのデスクの作業領域において若干の照度ムラが生じていることがわかる。この結果において最も照度・色温度のムラが大きかった執務机における照度均斉度は 0.78 となった。JIS で定められているオフィスにおける基準均斉度は 0.70 であるため、この基準は満たしている。本実験においては、照度・色温

度の評価をデスク中央の 1 点に設置したセンサに置いて評価し、その値に基づいて制御を行っているため、各デスクに計算面を設定し、その値に基づいて制御する方式を用いれば照度・色温度のムラを更に少なくした制御を行えると考えられる。

## 5. むすび

カットオフダウンライトを用いることにより、従来の天井照明では達成できなかった照度・色温度提供精度をより少ない電力消費で達成できることが明らかになった。これにより、知的照明システムを応用する環境の幅が広がるため、本研究により知的照明システムの普及を進めることができると考えている。

## 参考文献

- 1) P.R.Boyce, N.H.Eklund, S.N.Simpson, "Individual Lighting Control Task Performance, Mood, and Illuminance", *Journal of the Illuminating Engineering Society*, **29**, 131-142 (2013).
- 2) B.Roisin, M.Bodart, A.Deneyer, P.D'Herdt, "Lighting Energy Savings in Offices Using Different Control Systems and Their Real Consumption", *Journal of Energy and Buildings*, **40**, 514-523 (2008).
- 3) J.C.Lam, A.L.S. Chan, "Energy Audits and Surveys of Air-Conditioned Buildings", *Proc. Australian and New Zealand Architectural Science Association Conference*, **23**, 49-54 (1995).
- 4) M.Miki, T.Hiroyasu, K.Imazato, "Proposal for an Intelligent Lighting System, and Verification of Control Method Effectiveness", *Proc IEEE CIS*, **94**, 520-525 (2004).
- 5) F.Kaku, M.Miki, T.Hiroyasu, M.Yoshimi, S.Tanaka, T.Nishida, N.Kida, M.Akita, J.Tanisawa, T.Nishimoto, "Construction of Intelligent Lighting System Providing Desired Illuminance Distributions in Actual Office Environment", *Artificial Intelligence and Soft Computing*, **6114**, 451-460 (2010).
- 6) M.Miki, K.Imazato, M.Yonezawa, "Intelligent Lighting Control Using Correlation Coefficient Between Luminance and Illuminance", *Proc. IASTED Intelligent Systems and Control*, **497**[078], 31-36 (2005).
- 7) S.Tanaka, M.Miki, T.Hiroyasu, M.Yoshikata, "An Evolutional Optimization Algorithm to Provide Individual Illuminance in Workplaces", *Proc IEEE Int. Conf. Syst. Man. Cybern.*, 941-947 (2009).
- 8) 鹿倉智明, 森川宏之, 中村芳樹, "オフィス照明環境における明るさの変動知覚に関する研究", *照明学会誌*, **85**[5], 346-351 (2001).
- 9) N.Narendran, S.Vasconez, P.Boyce, N.Eklund, "Just-Perceivable Color Differences between Similar Light Sources in Display Lighting Applications", *Journal of the Illuminating Engineering Society*, **29**[2], 68-77 (2000).