単位光束法の照明器具高さによる補正とその適用範囲

CORRECTION OF FLUX-UNIT METHOD BY LUMINAIRE HEIGHT AND THE APPLICABLE RANGE

松下 進*, 三木保弘**, 上谷芳昭***

Susumu MATSUSHITA, Yasuhiro MIKI and Yoshiaki UETANI

"Flux-unit method" that we proposed previously is a simple lighting design method applicable to both non-integrated luminaires and integrated luminaires for residential architects. In the method, the room's total luminaire luminous flux is calculated, and then, according to the zoning of residential behaviors in the room, luminaire luminous flux is distributed within the limits of the total luminaire luminous flux considering total energy consumption. Since this method in our previous studies assumes the use of luminaires on the ceiling, it cannot be used when luminaire height is less than ceiling height. Therefore, we derived the correction formula of "Flux-unit method" by luminaire height using the relationship between square of luminaire height and "flux-unit", and we also executed a trial design with this correction formula. Consequently, it was shown that "Flux-unit method" is applicable to luminaires of various height under the limited applicable range used in this study.

Keywords : Flux-unit method, Lighting design, Residential lighting, Luminaire height, Ceiling height, Luminaire luminous flux

単位光束法, 照明設計, 住宅照明, 照明器具高さ, 天井高さ, 器具光束

1. はじめに

近年、住宅照明においては光環境および省エネルギー性の向上を実現する多灯分散照明方式¹⁾²⁾が普及しつつあり、さらに LED 照明が主流になってきている。そこで多灯分散照明方式および LED 照明に対応し、住宅建築設計者が簡易に照明設計を行えることを目的とした単位光束法³⁾⁴⁾⁵⁾が筆者らにより提案されている。

この設計法は、部屋の大きさや内装反射率といった設計条件ごとに、基準照度である床面平均照度 50 ルクスを得るのに必要な照明器具の器具光束^{注1)}である単位光束を一覧表にした単位光束表を、予めデータベースとして用意しておく^{注2)}ことで、住宅建築設計者が照度計算ソフトによる照度計算等を行わずに、室内全体の床面平均照度やゾーン^{注3)}の床面平均照度を得るためのラングプ型照明器具およびラングプ分離型照明器具の器具光束の量を手計算レベルで検討できる。また、照明器具の効率である固有エネルギー消費効率^{注4)}を用いて器具光束を消費電力に換算することで、室内全体やゾーンの消費電力を簡易に検討できる。

単位光束法においては、視作業を伴う生活行為を行うゾーンを明視照明ゾーンとして計画し、通常水平面照度を高く設定する。但し、明視照明ゾーンでは天井照明器具の使用を想定しており、天井高さも一定という前提条件がある。これは住宅照明でよく使われるシーリング

ライトやダウンライトのように天井と照明器具高さがほぼ等しい場合は問題がないが、ペンダントライトのように照明器具高さが天井高さとは異なる場合は使用できない。

単位光束法を照明器具高さが天井高さとは異なる場合に対応できる形とすることができれば、天井照明器具以外の照明器具が使用でき、単位光束法の適用範囲が拡大する。その際、照明器具高さが異なる場合の複数の単位光束表を作成するという方法も考えられるが、照明器具高さを細かく変化させると膨大な単位光束表の数となる恐れがあり、現実的でない。代わりに、従来の単位光束表における単位光束を照明器具高さにより補正する形の方が、設計者の利便性を重視するという単位光束法の本旨に沿う。そこでその補正式を導出し、設計例の試行を行うことにより、実務における簡便な照明設計法として照明器具の設置高さの適用範囲を拡大することを本研究の目的とする。

2. 単位光束法の設計手順および単位光束の算出手順

照明器具高さによる補正式の導出の前に、従来の単位光束法の設計手順および単位光束の算出手順を示す。

2. 1 単位光束法の設計手順

まず、従来の単位光束法の設計手順を示し、本研究の照明器具高さによる補正をどの段階で行うかを示す。

* 松下進建築・照明設計室 代表・工修
京都大学大学院 博士課程
** 国土交通省国土技術政策総合研究所住宅研究部
建築環境研究室 室長・博士(工学)
*** 京都大学工学研究科建築学専攻 准教授・工博
(2016年7月逝去)

President, Susumu Matsushita Architecture & Lighting Design Labo., M. Eng.
Grad. Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University
Head, Building Environment Division, Housing Department, National Institute for Land and
Infrastructure Management, MLIT, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

① 天井中央に拡散配光器具を設置すると仮定し、室内全体の最大光束 F_{max} を拡散配光器具の単位光束表（表 1）を用いて式(1)より算出する。設計照度 E_{room} は 100 ルクスを標準とする。基本照度 E_b は、単位光束表において基本となる床面平均照度 50 ルクスである。

$$F_{max} = F_{unit_lumi} (E_{room} / E_b) \quad \cdots (1)$$

F_{max} ：室内全体の最大光束 (lm)、 F_{unit_lumi} ：単位光束 (lm)、 E_{room} ：室内全体の設計照度 (lx)、 E_b ：基本照度 (lx)

② 室内全体の最大消費電力 W_{max} を式(2)より算出する。室内に標準的な効率の照明器具を設置した場合を基準として、その消費電力を超えないように設計を行うためである。式(2)における照明器具の固有エネルギー消費効率 L_{er} は、標準で 55 (lm/W) を想定している^{注 5)}。

$$W_{max} = F_{max} / L_{er} \quad \cdots (2)$$

W_{max} ：室内全体の最大消費電力 (W)、 L_{er} ：照明器具の固有エネルギー消費効率 (lm/W)

③ 視作業を伴い明るさを必要とする部分である明視照明ゾーンにおける明視照明用部分光束 F_{task} を式(3)より算出する。その際、表 1 における採用予定の照明器具に近い配光の単位光束表を用いて、対象ゾーンの面積から単位光束を選択する。水平面照度を得るために直接照明形⁶⁾の配光器具を用いるが、一般的に比較的集光性の高い中照配光器具は狭い範囲で用い、拡散性の高い拡散配光器具は広い範囲で用い、中間的な光の広がりを持つ広照配光器具は中照配光器具と拡散配光器具で用いる範囲の中間的な範囲で用いる。設計照度 E_{zone} は、生活行為から JIS 照明基準総則⁷⁾を参照して決定する。

$$F_{task} = F_{unit_lumi} (E_{zone} / E_b) \quad \cdots (3)$$

F_{task} ：明視照明用部分光束 (lm)、 E_{zone} ：明視照明ゾーンの設計照度 (lx)

④ 明視照明用部分消費電力 W_{task} を式(4)より算出する。照明器具の選択時に器具光束と併せて照明器具の消費電力を考慮するための目安であり、消費電力がこの段階で多少超過しても問題ない。

$$W_{task} = F_{task} / L_{er} \quad \cdots (4)$$

W_{task} ：明視照明用部分消費電力 (W)

⑤ 雰囲気を作り、明るさを必要としない部分である雰囲気照明ゾーンにおける雰囲気照明用部分光束 $F_{ambient}$ を式(5)より算出する。雰囲気照明器具は床面照度の確保を優先しないため、配光は任意とする。

$$F_{ambient} = F_{max} - F_{task} \quad \cdots (5)$$

$F_{ambient}$ ：雰囲気照明用部分光束 (lm)

⑥ 雰囲気照明用部分消費電力 $W_{ambient}$ を式(6)より算出する。④と同様に、照明器具の選択時に器具光束と併せて照明器具の消費電力を考慮するための目安であり、消費電力がこの段階で多少超過しても問題ない。

$$W_{ambient} = W_{max} - W_{task} \quad \cdots (6)$$

$W_{ambient}$ ：雰囲気照明用部分消費電力 (W)

⑦ 各ゾーンの部分光束と部分消費電力を参照し、部分光束が照明器具の器具光束と灯数の積に近くなるように照明器具を選定し、数量を決定する。

⑧ 選定した全ての照明器具の合計消費電力が、室内全体の最大消費電力以内であることを確認する。

ここまでが従来の単位光束法の設計手順であるが、本研究における照明器具高さによる補正は、明視照明ゾーンの照明器具を対象とするため、設計手順③における明視照明用部分光束算出時において行う。

表 1 天井照明器具における単位光束表

面積(畳) ^{注 1)}		2	4.5	6	8	10	12.5
拡散配光	内装反射率(%) 天井 70 壁 30 床 10	1350	1700	1950	2200	2500	2850
	内装反射率(%) 天井 70 壁 50 床 10	1100	1450	1700	1950	2250	2600
	内装反射率(%) 天井 70 壁 70 床 10	850	1250	1450	1700	2000	2350

表注 1：2 畳から 12.5 畳の範囲に適用する

面積(畳) ^{注 2)}		1	2	4.5	6	8	10
広照配光	内装反射率(%) 天井 70 壁 30 床 10	750	850	1100	1300	1500	1700
	内装反射率(%) 天井 70 壁 50 床 10	650	700	1000	1150	1400	1600
	内装反射率(%) 天井 70 壁 70 床 10	500	600	900	1050	1250	1500

表注 2：1 畳から 10 畳の範囲に適用する

面積(畳) ^{注 3)}		0.5	1	2	4.5	6	8
中照配光	内装反射率(%) 天井 70 壁 30 床 10	300	360	440	700	870	1070
	内装反射率(%) 天井 70 壁 50 床 10	270	330	410	670	840	1040
	内装反射率(%) 天井 70 壁 70 床 10	230	290	370	640	810	1020

表注 3：0.5 畳から 8 畳の範囲に適用する

2. 2 単位光束の算出手順

次に、単位光束の算出手順を示す。但し、単位光束表は単位光束法の使用時には予め用意されており、設計者が算出する必要はない。

- ① 照明空間の大きさを設定する。
- ② 天井、壁、床の反射率を設定する。
- ③ 対象照明器具の配光を設定する。
- ④ 照明器具を天井中央に配置する。
- ⑤ 照明計算を行い、床面平均照度 E_{av} (lx) を計算させる。

Radiance^{注 6)}のパラメータ：-ab 3, -aa 0.15, -ar 128, -ad 512, -as 256^{注 7)}

⑥ 基準照度 50 (lx) と E_{av} (lx) の比に対象照明器具の器具光束 F_{lumi} (lm) を乗じて、単位光束 F_{unit_lumi} (lm) を式(7)より算出する。

$$F_{unit_lumi} = F_{lumi} (50 / E_{av}) \quad \cdots (7)$$

F_{lumi} ：対象照明器具の器具光束 (lm)、 E_{av} ：床面平均照度 (lx)

表 1 の単位光束算出における建築および照明の前提条件は表 2、照明器具は表 3 および図 1 の通りである。既存の単位光束表は表 1 のみであるが、新しい照明器具の単位光束表を作成する際も、表 2 を前提条件とする。

表 2 単位光束算出における建築および照明の前提条件

建築条件	天井高さ (m)	2.4 に固定
	天井面反射率 (%)	70 に固定
	壁面反射率 (%)	70、50、30 の三種類
	床面反射率 (%)	10 に固定 ^{注 1)}
照明条件	部屋の床面積 ^{注 2)} (畳)	拡散配光時：2、4.5、6、8、10、12.5
		広照配光時：1、2、4.5、6、8、10
		中照配光時：0.5、1、2、4.5、6、8
	照明器具の平面位置	天井中央に一灯
	照明器具高さ (m)	2.4 に固定
	照明器具の配光	集光性の低い直接照明形配光
	照明器具の光束	器具光束 (ランプ光束ではない)
	被照面	床面に固定
	保守率	0.7
	基本照度 (lx)	50

表注 1：10% より高い反射率も考えられるが、床面に置かれる家具などが特定できないため安全側である低い反射率を採用している

表注 2：部屋の平面形状は正方形あるいは正方形に近い長方形

表 3 単位光束算出用照明器具

配光の型	照明器具の種類	器具光束 (lm)
拡散	47WLED シーリングライト	4500
広照	8.8W 電球形LED ランプダウンライト	450
中照	6.9W LED ランプ一体型ダウンライト	370

図 1 単位光束算出用照明器具の配光曲線図

3. 照明器具高さによる補正式の導出

3. 1 照明器具高さによる補正式導出の検討手順

照明器具高さから単位光束を予測する補正式は、複数の照明器具高さの単位光束を算出した後、照明器具高さとその単位光束との相関を用いて導く。その際、住宅ではシーリングライトなどの天井照明のように照明器具と天井高さが等しい場合の単位光束が多く使われるため、その単位光束を照明器具高さに応じて補正する方法を検討する。但し、照明器具高さが天井高さより大きいことは一般的に考えられないため、照明器具高さが天井高さより小さい場合のみを検討する。

また、従来の単位光束法で想定している天井照明器具と、ペンダントライトなどの照明器具高さが天井高さより小さい照明器具では、配光が異なることが考えられる。天井照明器具は下半球光束⁸⁾主体の直接照明形の配光であるが、ペンダントライトなどは直接照明形だけでなく、下半球光束と上半球光束⁹⁾が同程度、あるいは下半球光束より上半球光束が多く出る配光も多い。しかし本研究における照明器具高さによる補正は、明視照明ゾーンで用いられる照明器具を対象としており、本来、明視照明ゾーンにおいて使用される照明器具は、机上面や床面の水平面照度を効率的に得る目的で設置されるため直接照明形の配光を持つ照明器具が用いられる。そのため単位光束法では、照明器具高さが天井高さとは異なる照明器具においても直接照明形のタイプを対象とし、直接照明形以外のタイプは、明視照明用照明器具でなく、雰囲気照明用照明器具として扱うこととする。補正式検討の流れおよび照明器具の設置位置(図2)を以下に示す。

- ① 照明器具高さ H に応じた単位光束 $UF(H)$ の算出
 - ② 照明器具高さ H と算出した単位光束 $UF(H)$ との相関の検討
 - ③ 照明器具高さ 2.4m の単位光束 $UF(2.4)$ を用いた補正式の導出
- $UF(H) = f(UF(2.4), H)$

図 2 照明器具の設置位置

3. 2 照明器具高さに応じた単位光束の算出

照明器具高さに応じて、基準照度である床面平均照度 50 ルクスを得るための単位光束を算出する。

3. 2. 1 単位光束算出の条件

建築および照明の前提条件は照明器具高さの項目以外は表 2、表 3 および図 1 の通りであり、照度計算ソフトは Radiance^{注6)}を用いた。

3. 2. 2 単位光束の算出

単位光束算出の条件に従って、各照明器具高さにおける単位光束を算出した。照明器具高さの種類は無数に考えられるが、照明器具高さと天井高さが等しい場合の単位光束を用いた補正を考えることから、代表値として天井高さから算出しやすい高さとした。単位光束算出時のパラメータは表 2 のパラメータに照明器具高さを加えた表 4 の通りであり、条件は全部で 324 通りとなる。算出した単位光束表の例を表 5 に示す。

表 4 単位光束算出における高さを考慮したパラメータ

パラメータ	数	要素
照明器具高さ(m)	6	0.6、0.8、1.2、1.6、1.8、2.4
照明器具の配光	3	拡散、広照、中照
部屋の床面積 ^{注)} (畳)	6	拡散配光時: 2、4.5、6、8、10、12.5
		広照配光時: 1、2、4.5、6、8、10
		中照配光時: 0.5、1、2、4.5、6、8
部屋の壁面反射率(%)	3	30、50、70

表注: 床面積の適用畳数は配光によって異なるが、いずれも 6 種類

表 5 照明器具高さに応じた単位光束表の例

[照明器具高さ 0.6m の場合の単位光束(lm): 中照配光の場合]

面積(畳)		0.5	1	2	4.5	6	8
中照配光	内装反射率(%) 天井70 壁30 床10	76	137	248	531	697	916
	内装反射率(%) 天井70 壁50 床10	74	135	247	529	695	914
	内装反射率(%) 天井70 壁70 床10	71	132	244	527	693	912

3. 3 照明器具高さと算出した単位光束との相関の検討

3. 3. 1 近似式を用いた相関の検討

前項で求めた 324 通りの単位光束に基づき、各条件における照明器具高さ H と単位光束 $UF(H)$ の関係を配光・壁面反射率の組み合わせ 9 通りでグラフ化し、部屋の床面積の違い 6 通りそれぞれについて、 H を変数として $UF(H)$ を近似する 2 次式を得た(図 3)。この近似式を用いれば、照明器具高さから直接単位光束が得られるが、単位光束法では設計者が手計算で簡易に室内光束が算出できることを特長としており、各条件において異なった近似式を用いると、全部で 54 通りの 2 次式が必要となることから、煩雑である。

図 3 照明器具高さ H と単位光束 $UF(H)$ の関係[中照配光、壁面反射率 30%の場合]

3.3.2 近似式の簡易化の検討

ここで照度計算の基本である逆2乗則を顧みると、被照面の直射照度が一定の場合、照明器具の光度値は照明器具と照射面の距離の2乗に比例する。また、器具光束は光度値の積分で算出できる。さらに、照明器具の高さが変わっても、室内の間接照度は室内の表面積と反射率により決まるため、建築条件が等しい場合は概ね一定となる^{注8)}。これらから、単位光束は直接照度に関わる照明器具高さの2乗を変数とする変数項と間接照度に関わる定数項の和のみで近似できる可能性があり、これは前項の H の2次式における1次項を減らせる可能性を示している。そこで、その簡易化を検討することとした。

各条件における照明器具高さの2乗 H^2 と単位光束 $UF(H)$ の関係を前項と同様にグラフ化し、 H の1次項のない $UF(H)$ の近似式を得た(図4)。ここで、照度計算ソフトを用いて算出した $UF(H)$ を真値とし、 H の1次項のある前項の近似式を用いて $UF(H)$ を算出した場合の誤差と、 H の1次項のない本項の近似式を用いて $UF(H)$ を算出した場合の誤差を比較した。 H の1次項のある近似式による誤差は±1%以内であり、 H の1次項のない近似式による誤差は中照配光器具の点数において2%を超えるものの、概ね±2%以内となった(図5)。これより、本項で導いた H の1次項のない、 H^2 の変数項と定数項のみから成る近似式は、やや精度が低くなるが簡便な式として適用範囲にある。

図4 照明器具高さの2乗 H^2 と単位光束 $UF(H)$ の関係 [中照配光、壁面反射率30%の場合]

図5 H の1次項のある近似式と H の1次項のない近似式の誤差 [中照配光、壁面反射率30%の場合]

3.4 照明器具高さ2.4mの単位光束を用いた補正式の導出

3.4.1 近似式の傾きを一つの定数とする更なる簡易化の検討

図4において、近似式の傾きは部屋の6通りの畳数ごとにあまり変わらない。これは、3.3.2項の H^2 の変数項と定数項のみから成る近似式による補正は、床面積に関わらず、近似式の傾きを一つの定数と

することにより更に簡易化できる可能性を示している。そこで、傾きを一つの定数で代表する補正式を検討する。

但し、照明器具高さ2.4mの場合の単位光束 $UF(2.4)$ をもとに照明器具高さが2.4mより小さい場合の $UF(H)$ を算出することを想定しているため、 $UF(2.4)$ と、その光束を照明器具高さ H により補正する光束(補正光束 $CF(H)$)を用いた補正とした。 $UF(H)$ は $UF(2.4)$ より小さいため、補正式は $UF(2.4)$ から $CF(H)$ を差し引く形となる(式(8))。

$$UF(H) = UF(2.4) - CF(H) \quad \cdots (8)$$

$UF(H)$: 照明器具高さ H における単位光束(lm)、

H : 照明器具高さ(m)、

$UF(2.4)$: 照明器具高さ2.4mにおける単位光束(lm)、

$CF(H)$: 照明器具高さ H による補正光束(lm)

式(8)において、 $UF(H)$ は3.3.2項の H^2 の変数項と定数項のみから成る近似式で近似でき、 $UF(2.4)$ は H が2.4mの場合であるから、 $UF(2.4)$ と $UF(H)$ の差である $CF(H)$ は定数項が相殺され、 2.4^2 と H^2 の差を変数とする比例の式で近似できると考えられる。図6は、図4の床面積4.5畳の場合における上記の関係をグラフ上で示したものである。そこで、 2.4^2 と H^2 の差と、補正光束 $CF(H)$ の関係をグラフ化すると、両者はほぼ比例関係にあることが確認できた(図7)。

図6 照明器具高さの2乗 H^2 と補正光束 $CF(H)$ との関係 [中照配光、壁面反射率30%、床面積4.5畳の場合]

図7 2.4^2 と H^2 の差と補正光束 $CF(H)$ の関係 [中照配光、壁面反射率30%の場合]

ここで図7は図4より導かれており、図4と同様に部屋の畳数ごとの近似式の傾きの違いは小さい。そこで、まず近似式の傾きを一覧にした表6から、近似式の傾きの標準偏差と変動係数を算出した(表7)。その結果、拡散配光器具および広照配光器具は変動係数が最大でも6%程度であり、散らばりは小さい。それらと比較して中照配光器具の散らばりは大きく、変動係数が10%以上となっている。これらから、中照配光器具の誤差がやや大きくなる恐れはあるが、全体的に近似式の傾きの散らばりは小さいため、壁面反射率が等しい場合は、床

面積に関わらず、傾きを一つの定数で代表する補正式により補正できる可能性が高い。そこで、部屋の畳数ごとの近似式の傾きが一定と仮定して、補正式の検討を行った。

表 6 近似式の傾き

[拡散配光器具]

壁面反射率 (%)	畳数(畳)						平均
	2	4.5	6	8	10	12.5	
30	183	189	194	196	201	203	194
50	138	145	150	153	158	160	151
70	100	105	110	112	116	119	110

[広照配光器具]

壁面反射率 (%)	畳数(畳)						平均
	1	2	4.5	6	8	10	
30	112	105	104	106	104	105	106
50	91	83	83	85	84	85	85
70	70	63	63	65	64	65	65

[中照配光器具]

壁面反射率 (%)	畳数(畳)						平均
	0.5	1	2	4.5	6	8	
30	42	42	37	32	32	29	36
50	36	36	31	27	27	24	30
70	30	30	25	22	22	19	25

表 7 近似式の傾きの標準偏差と変動係数

壁面反射率 (%)	標準偏差			変動係数 (%)		
	拡散	広照	中照	拡散	広照	中照
30	6.7	2.9	5.0	3.4	2.8	14.0
50	7.4	2.5	4.6	4.9	3.0	15.0
70	6.4	2.3	4.1	5.8	3.6	16.9

3.4.2 暫定補正式の導出

2.4²とH²の差と補正光束CF(H)はほぼ比例関係にあることから、式(8)を参照し、暫定補正式を以下の式(9)とした。Hを変数とする2次式であるが、H²の変数項と定数項のみから成る簡便な式となった。各配光器具において、壁面反射率が等しい場合は近似式の傾きが一定と仮定しているため、式(9)における定数Cは畳数によって変化せず、更に簡便となっている。

UF(H) = UF(2.4) - C(2.4² - H²) . . . (9)

C: 定数

3.4.3 補正による誤差を最小化する定数Cの値の検討

式(9)において定数Cを畳数によって変化しない定数とした場合に、暫定補正式を用いて算出した単位光束と照度計算ソフトにて算出した単位光束との誤差が最小となる定数Cの値を検討した。その際、暫定補正式を用いて算出した単位光束の照度計算ソフトにて算出した単位光束に対する比(=R)を算出し、誤差を確認した。

表6における近似式の傾きの各平均値付近の値を当てはめて、誤差を最小化する定数Cの値を求めた結果、各条件でRが0.9~1.1の間にあり、誤差が±10%以内に収まる定数Cの値を見出した(表8)。±10%以内に収まる定数Cの値が複数ある場合は、照明設計においては明るくなる方の誤差が安全側であるため、マイナスの誤差が小さくなる数値を選択するとともに、誤差の上下幅が小さくなる数値を選択した。但しマイナスの誤差が0である場合は、実際の光束値が少しでも補正値を下回ると必ず誤差が生じることになるため除いている。また、上下の誤差がいずれも等しい場合は、設計者の計算時の利便性から切りのよい数値を選択している。

各条件におけるRを示したものが図8である。但し、照明器具高

さ2.4mの場合はR=1になることが自明であるので、データから省いている。誤差が最大となる可能性の高い中照配光、壁面反射率70%のRを表9に示した。これらより、Rが0.9~1.1の間にあることが分かる。

表 8 定数Cの検討値

壁面反射率 (%)	拡散			広照			中照		
	定数C	最大誤差(%)		定数C	最大誤差(%)		定数C	最大誤差(%)	
		+	-		+	-		+	-
30	183	9	0	108	13	6	39	16	8
	184	8	1	109	10	8	40	10	9
	185	7	2	110	7	10	41	5	11
50	139	9	2	87	12	8	34	12	8
	140	8	2	88	8	10	34.5	9	9
	141	8	3	89	5	12	35	7	10
70	99	8	1	66	12	7	28	12	9
	100	8	1	67	9	9	28.5	9	10
	101	7	2	68	5	11	29	7	11

表注: 斜字を採用

図 8 暫定補正式を用いて算出した単位光束の照度計算ソフトにて算出した単位光束に対する比R (H=2.4mを除く)

表9 表8中の定数Cを用いて補正した単位光束値UF(H)および暫定補正式を用いて算出した単位光束の照度計算ソフトにて算出した単位光束に対する比R〔中照配光、壁面反射率70%の場合〕
〔UF(H) (lm)〕

器具高さ(m)	畳数(畳)					
	0.5	1	2	4.5	6	8
2.4	229	290	375	639	806	1015
1.8	149	213	307	579	746	963
1.6	129	192	290	564	733	951
1.2	97	160	264	543	712	932
0.8	77	138	249	531	699	917
0.6	71	132	244	527	693	912

器具高さ(m)	畳数(畳)					
	0.5	1	2	4.5	6	8
2.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.8	1.05	1.03	0.99	0.98	0.98	0.98
1.6	1.07	1.04	0.98	0.97	0.98	0.97
1.2	1.09^{注)}	1.05	0.95	0.95	0.96	0.96
0.8	1.08	1.04	0.92	0.93	0.94	0.95
0.6	1.06	1.04	0.90^{注)}	0.92	0.94	0.94

表注：斜字は最大値および最小値

図8より、拡散配光は誤差がほぼプラスに偏っているのに対して、広照配光と中照配光では誤差がプラスとマイナスに分かれている。これは、まず拡散配光はマイナスの誤差が小さくなる定数Cの値を採用しているため概ねプラスの誤差が生じる。それに対して広照配光と中照配光ではプラスおよびマイナスの誤差が生じる定数Cの値を採用しており、その値が1畳の場合の近似式の傾きと2畳の場合の近似式の傾きの間にあるため、1畳以下の場合はプラスの誤差が生じ、2畳以上の場合はマイナスの誤差が生じるためである。

3.4.4 照明器具高さによる補正式

全条件において、暫定補正式を用いて算出した単位光束の照度計算ソフトにて算出した単位光束に対する比Rが0.9～1.1の間にあり、誤差が±10%以内に収まったため、照明器具高さ0.6～2.4mにおける単位光束の照明器具高さによる補正式は式(9)にて問題ないことが確認できた。但し、拡散配光器具と比較して広照配光器具と中照配光器具はマイナスの誤差の幅が2倍程度ある。定数Cは、配光の種類と壁面反射率ごとに異なり、最終的に表10に示す9通りの値を取る。

$$UF(H) = UF(2.4) - C(2.4^2 - H^2) \quad \cdots (9)$$

表10 定数Cの値

		拡散配光器具	広照配光器具	中照配光器具
壁面反射率(%)	30	184	109	40
	50	140	88	34.5
	70	100	67	28.5

この補正式の適用範囲は、天井高さを2.4m、天井面反射率を70%、壁面反射率を70%、50%、30%のいずれか、床面反射率を10%とした室内において、部屋あるいは明視照明ゾーンの床面積を拡散配光時は2～12.5畳、広照配光時は1～10畳、中照配光時は0.5～8畳とし、直接照明形で、拡散、広照、中照のいずれかの配光の照明器具を天井中央の平面位置に一灯設置する場合に限る。

また、この補正式は誤差を±10%以内としている。通常、人間の感覚量は刺激量の対数に比例し⁹⁾、明るさにおいても同様である。また人間が明るさの違いを認識するには、約1.5倍の照度比が必要と考えられており、この考え方をを用いて、JIS照明基準総則⁷⁾では照度の基

準値を概ね1.5倍ずつ増加させている。このことから、住宅で必要な照度を考える場合、基準値の50%（基準値/1.5～基準値×1.5の間）を許容範囲として問題ないと考えられる。今回の研究では基準値の±10%を誤差としており、十分に安全側の許容範囲と考えられる。

4. 照明器具高さによる補正式を用いた設計の試行

単位光束法の設計手順に従いながら、3.4.4項で示した照明器具高さによる補正式を用いた場合の実際の部屋を想定した設計の試行を行い、どのような算出結果となるかの例を示す。

4. 1 室内全体の最大光束および最大消費電力の算出

想定した部屋は、天井高さ2.4mで広さが8畳、内装反射率が天井70%、壁70%、床10%の個室である（図9）。設置する照明器具はペンダントライトを想定していることから、照明器具設置高さ（照明器具の下面の高さ）は1.4mとし、被照面は主にローテーブル付近を想定している2畳の明視照明ゾーン（ゾーン1）の床面とした。ローテーブルは床面より高くなるが、住まい手にとって明るくなる方の安全側であるので、高さは無視している。

図9 設計試行例の建築条件

まず、この室内全体の最大光束および最大消費電力を算出する。拡散配光器具の単位光束表（表1）から、この条件における単位光束は1700(lm)となる。室内全体の設計照度を100(lx)とすると、室内全体の最大光束F_{max}および最大消費電力W_{max}は以下のように算出できる。

$$F_{max} = 1700 \times (100 / 50) = 3400 \text{ (lm)}$$

$$W_{max} = 3400 / 55 \approx 61.8 \text{ (W)}$$

ここで最大消費電力W_{max}を最大光束F_{max}より求める際に用いる照明器具の固有エネルギー消費効率は、単位光束法の設計手順に示すように標準の55(lm/W)^{注5)}を用いている。

4. 2 明視照明ゾーンの部分光束および部分消費電力の算出

ゾーン1を主たる生活空間と想定し、設計照度を200(lx)と設定する。この200(lx)を拡散配光のペンダントライトが賄うとすると、拡散配光器具の単位光束表（表1）から単位光束は1350(lm)となる。この時、ゾーン1は部屋の中央付近に位置しており、壁面がない状態であることから、壁面反射率が最も低い値（＝30%）を採用する^{注9)}。

ここでペンダントライトの高さは1.4mであるので、照明器具高さによる補正を行う。式(9)にUF(2.4)=1350(lm)とH=1.4mおよび表11より抽出したC=184を代入すると、UF(1.4)≒651(lm)となる。

$$UF(1.4) = 1350 - 184 \times (2.4^2 - 1.4^2) \approx 651 \text{ (lm)}$$

これよりゾーン1における明視照明用の部分光束 F_{task} および部分消費電力 W_{task} は以下のように算出できる。

$$F_{task} = 651 \times (200 / 50) = 2604 \text{ (lm)}$$
$$W_{task} = 2604 / 55 \approx 47.3 \text{ (W)}$$

但し、照明器具高さの補正は下半球光束⁸⁾のみを持つ天井照明が前提条件になっているため、採用するペンダントライトは下半球光束が主体である直接照明形の配光を用い、部分光束 F_{task} は採用する照明器具の下半球光束のみを対象とする。ペンダントライトにおいては、直接照明形においても少しの上半球光束⁸⁾を持つ場合があるが、これは室内全体の最大光束 F_{max} には含めるが、明視照明用の部分光束 F_{task} には含めない。

4. 3 雰囲気照明ゾーンの部分光束および部分消費電力の算出

さらに、ゾーン1以外のゾーンを雰囲気照明ゾーンとし、そのゾーンにおける部分光束および部分消費電力を算出する。

4. 2 節の結果より、雰囲気照明用の部分光束 $F_{ambient}$ および部分消費電力 $W_{ambient}$ は以下のように算出される。

$$F_{ambient} = F_{max} - F_{task} = 3400 - 2604 = 796 \text{ (lm)}$$
$$W_{ambient} = W_{max} - W_{task} = 61.8 - 47.3 = 14.5 \text{ (W)}$$

これより、雰囲気照明器具は合計で 796 (lm) および 14.5 (W) まで使用可能となる。ペンダントライトが上半球光束を持つ場合は、その光束およびその光束分の消費電力も含める。但し、最終的には室内全体で用いる消費電力の合計が最大消費電力 W_{max} 以下であれば問題ないため、ゾーンごとの消費電力の検討は目安とする。

4. 4 光束と消費電力の配分の検討および照明器具の選定

明視照明用に下半球光束主体の拡散配光のペンダントライトを1灯、雰囲気照明用にフロアスタンドを1灯採用すると想定した場合の各照明器具の光束および消費電力の配分例は表11の通りとなる。最後に各照明器具に配分された光束および消費電力を参照して、照明メーカーのカタログ等から採用する照明器具を選定する。

表 11 ペンダントライトを用いる場合の光束と消費電力の配分例

照明の種類	照明器具	配光の型	灯数	光束／灯 (lm)	消費電力／灯 (W)	光束×灯数 (lm)	消費電力×灯数 (W)
明視照明	ペンダントライト (下半球光束分)	拡散	1	2604	47.3	2604	47.3
雰囲気照明	ペンダントライト (上半球光束分)	-	1	260 ^{注1)}	4.7 ^{注2)}	260	4.7
	フロアスタンド	-	1	536 ^{注3)}	9.7 ^{注2)}	536	9.7
合計						3400	61.7

表注 1：例として下半球光束の 10% としている。
表注 2：標準の固有エネルギー消費効率(55 (lm/W)) で除して算出している。
表注 3：雰囲気照明器具の光束の合計が 796 (lm) となるように算出している。

5. 照度計算ソフトを用いた光環境および消費電力の確認

単位光束法の照明器具高さによる補正を用いて照明器具を選定した場合の光環境および消費電力の実用性を、4 章の設計試行例の条件に基づき、照度計算ソフトを使用して室内の照度分布を検討する専門的な照明設計法（以下「詳細法」とする）を用いて確認した。

5. 1 詳細法による照明設計

設計試行例の結果をもとに、実在の照明器具を選定して適切に配置し（図 10）、照度分布図を作成した。正確な照明器具の設置位置および配光データを用いて、照度計算ソフト^{注10)}を活用し、直接光によ

る照度値と相互反射計算を行って算出した間接光による照度値を合計して床面における逐点の照度値を算出している。図 11 がその際に作成した照度分布図であり、表 12 が使用器具の一覧表、表 13 が算出した床面平均照度値の一覧表である。

図 10 ペンダントライトを用いる場合の照明器具配置

図 11 ペンダントライトを用いる場合の床面照度分布図

表 12 ペンダントライトを用いる場合の使用器具

ゾーン	照明器具	配光の型	ランプ	光束 (lm)	消費電力 (W)	灯数
ゾーン1 (明視照明)	ペンダントライト (下半球光束分)	拡散	内蔵 LED	2604 ^{注1)}	37.4 ^{注2)}	1
ゾーン1以外 (雰囲気照明)	ペンダントライト (上半球光束分)	-	-	389 ^{注3)}	5.6 ^{注2)}	-
	フロアスタンド	全周 ^{注4)}	電球形 LED ランプ	380	6.2	1

表注 1：調光を想定し、単位光束法で算出した光束を用いている。
表注 2：光束を採用した照明器具の固有エネルギー消費効率(69.6 (lm/W)) で除して算出している。
表注 3：照明器具の上半球光束にゾーン1の下半球光束と同じ調光率を乗じて算出している。
表注 4：照明器具の全周に光が出る配光。

表 13 ペンダントライトを用いる場合の床面平均照度値

ゾーン	平均照度 (lx)	均斉度 (最小/平均)	光束合計 (lm)	消費電力合計 (W)
ゾーン1	223	0.64	2604	37.4
ゾーン1以外	-	-	769	11.8
室内全体	129	0.17	3373	49.2

5. 2 光環境および消費電力の確認

単位光束法では室内全体の設計照度を 100 (lx)、ゾーン1の設計照度を 200 (lx) と設定しているが、表 13 の結果より、室内全体においては床面平均照度が 100 (lx) 以上、ゾーン1においては 200 (lx) 以上得られており問題ない。また、照度分布図から室内全体において概ね 50 (lx) 以上となっており、JIS 照明基準総則⁷⁾における全般の床面平均照度が 50 (lx) であることから、暗い部分がほとんどないことが確認できた。消費電力は最大消費電力以下であり、標準的な消費電力より小さいため問題ない。

6. 考察

6. 1 照明器具高さによる補正の実用性

単位光束法の照明器具高さによる補正の実用性の検討のため、4章および5章にて設計例の試行と詳細法による検証を行った。その結果、光環境および消費電力の両面で問題はなく、簡易設計法としての単位光束法における照明器具高さによる補正の実用性が高い可能性が示された。

6. 2 照明器具高さによる補正の留意点

本研究にて導出した照明器具高さによる補正式の適用範囲は3. 4. 4項に示した通りであるが、室内各面の反射率が適用範囲より大きい条件においては、床面平均照度が+10%を超える誤差になる可能性があるが、照明設計上安全側として、本補正式の使用は可能と考えられる。

また、照明器具高さによる補正を含む単位光束法の使用に際しては、設計時に居室における生活行為の種類を明確にしておく必要がある、雰囲気照明を優先する設計に適していない、単位光束法を用いても不適切な照明器具の選択や配置を行った場合に光環境の問題が生じるなど、前報³⁾からの留意点も引き継いでいる。

7. まとめ

7. 1 結論

単位光束法は住宅建築設計者が簡易に照明設計を行えることを目的とした照明設計法であるが、従来は明視照明ゾーンにおいて、シーリングライトなどの天井照明のみが適用対象であった。

本研究において、照明器具高さが2. 4mの場合の単位光束と照明器具高さが2. 4mより小さい場合の単位光束の差に着目し、照明器具高さ0. 6~2. 4mにおける単位光束の照明器具高さによる補正式を導出した。これにより、明視照明ゾーンにおいて、ペンダントライトなどの照明器具高さが天井高さより小さい照明器具にも対応できる単位光束法となった。

この補正式は、設計照度としての床面平均照度における誤差を±10%以内とすると、天井高さを2. 4m、天井面反射率を70%、壁面反射率を70%、50%、30%のいずれか、床面反射率を10%とした部屋において、部屋あるいは明視照明ゾーンの床面積を拡散配光時は2~12. 5畳、広照配光時は1~10畳、中照配光時は0. 5~8畳とし、直接照明形で、拡散、広照、中照のいずれかの配光の照明器具を天井中央の平面位置に一灯設置する場合が適用範囲と定まる。但し、室内各面の反射率が適用範囲より大きい条件においては、床面平均照度が+10%を超える誤差になる可能性はあるが、照明設計上安全側として、本補正式の使用は可能と考えられる。

また、設計試行例による検証により、補正式の実用性が高い可能性が示された。

7. 2 今後の課題

設計者の利便性を高めるために、本研究で示した適用範囲外の条件において、照明器具高さによる補正の適用の可否を検討し、適用範囲の拡大を図る必要がある。

謝辞

本研究は京都大学の原田和典教授の御指導・御助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

注

注1) 器具光束は照明器具から全ての方向に放出される光の量のこと。照明器具の光束にはランプ光束と器具光束があるが、単位光束の算出には器具光束を用いる。

注2) 新たに作成する際には共通のデータベースに一元化し、学会などの公的機関や照明メーカーなど多くの作成者が参加することが望ましい。

注3) 単位光束法では、室内を明るい部分と暗い部分に分ける手順があり、明るさのゾーニングと呼ぶが、その分けられた部分をゾーンと呼んでいる。

注4) 固有エネルギー消費効率(lm/W) = 器具光束(lm) / 消費電力(W)

注5) 今後増加すると考えられる電球色のランブー一体型LEDダウンライト(単位光束表における中照配光器具)の固有エネルギー消費効率に近い値を標準値として採用している。この値は、照明器具の効率向上や照明プランのスタイルの変化に合わせて、定期的に見直すことで将来の対応が可能となる。

注6) 照明計算アルゴリズムに光線追跡法を用いて照明シミュレーションを行うフリーソフトウェア。

注7) Radianceの解説書¹⁰⁾において人工照明使用時に適度に正確な(reasonably accurate)レンダリングに推奨されているパラメータ(・ab 2, ・aa 0. 15, ・ar 128, ・ad 512, ・as 256)よりも間接光の反射回数を1回多くして(・ab 3)、計算精度を高めている。

注8) 室内の間接照度は、その室内各面からの第一回反射光束、室内の表面積および平均反射率をパラメータとする算出式で近似できる¹¹⁾。本研究で想定する直接照明形配光の照明器具は床面への直接入射光およびその第一回反射光束が大きいため、その床面からの第一回反射光束、室内の表面積および平均反射率にて床面の間接照度を近似的に算出できるとみなせる。本研究においては、照明器具の高さを変えても、単位光束算出時の床面の基準照度および反射率は固定であるため、床面からの第一回反射光束は概ね一定であり、室内の表面積や室内各面の反射率も一定であることから、床面の間接照度は概ね一定となる。

注9) 住宅のような小規模な空間では、ゾーン外の照明器具から到達する光束や室内壁面からの反射光束による照度増加分が期待できるため、ゾーン四周に壁面がない状態においても壁面反射率30%の値を採用している³⁾。

注10) 東芝照明設計システムTX : CIE(国際照明委員会)の推奨法であるCIE法を改良したCIET法に基づく6面間相互反射連立方程式を解くアルゴリズムを採用した照度計算を行うソフトウェア¹²⁾。単位光束法算出時に用いたRadianceと異なるソフトウェアであるが、CIET法は照明計算理論として確立されており¹³⁾、前報までの設計試行例において本ソフトウェアを用いていることから、本研究の設計試行例においても照度分布図を同条件で作成するために用いている。

参考文献

- 1) 三木保弘, 戸倉三和子, 浅田秀男, 松下進: 小型高効率ランプを用いた多灯分散照明の提案とリビング・ダイニングにおける被験者評価及び省エネルギー性評価 住宅における多灯分散照明による光環境の質と省エネルギー性の両立に関する研究 その1, 日本建築学会環境系論文集, 603号, pp. 9-16, 2006. 5
- 2) JIEG-009 住宅照明設計技術指針, 照明学会, 2007
- 3) 松下進, 三木保弘: 単位光束法の提案 住宅における多灯分散照明方式に適した簡易照明設計法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 686号, pp. 325-331, 2013. 4
- 4) 松下進, 三木保弘, 上谷芳昭: 住宅におけるランプ分離型および一体型照明器具に対応する器具光束を用いた単位光束法の提案, 日本建築学会環境系論文集, 719号, pp. 57-64, 2016. 1
- 5) 準寒冷地版自立循環型住宅への設計ガイドライン, p. 306, 建築環境・省エネルギー機構, 2012
- 6) 照明学会編: 照明ハンドブック, p. 147, 照明学会, 2003
- 7) 日本工業標準調査会: JIS 照明基準総則 (JIS Z9110-2010)
- 8) 照明学会編: 照明ハンドブック, p. 70, 照明学会, 2003
- 9) 照明学会編: 照明ハンドブック, p. 260, 照明学会, 2003
- 10) Axel Jacobs, Radiance Tutorial, JALOX, p. 32, 2012
- 11) 松浦邦男, 建築照明, 共立出版, pp. 115-116, 1971
- 12) 菊池壮一他, 照明設計支援システム, 照明学会全国大会講演論文集 30, p. 144, 1997
- 13) 高橋貞夫他, 室内照明における照度予測の電子計算化, 照明学会誌 54(12), pp. 697-707, 1970. 12

CORRECTION OF FLUX-UNIT METHOD BY LUMINAIRE HEIGHT AND THE APPLICABLE RANGE

Susumu MATSUSHITA^{}, Yasuhiro MIKI^{**} and Yoshiaki UETANI^{***}*

^{*} President, Susumu Matsushita Architecture & Lighting Design Labo., M. Eng.

Grad. Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University

^{**} Head, Building Environment Division, Housing Department, National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT, Dr. Eng.

^{***} Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.

"Flux-unit method" that we proposed previously is a simple lighting design method applicable to both non-integrated luminaires and integrated luminaires for residential architects. By using "Flux-unit method", the architects can design the brightness in the room depending on the chamber size and interior reflectance easily. They can calculate the amount of luminaire luminous flux of luminaires to obtain necessary floor average illuminance of whole or zone of the room manually. Further, they can calculate the amount of electric energy by converting luminaire luminous flux into wattage with luminaire efficacy rating.

Since this method in our previous studies assumes the use of luminaires on the ceiling, there is a precondition that luminaire height is constant. Although there is no problem when luminaire height is nearly equal to ceiling height, such as ceiling lights and down lights that are often used in residential lighting, this method cannot be used when luminaire height is less than ceiling height as pendant lights.

Therefore, the purpose of this study is to propose the correction formula of "Flux-unit method" by luminaire height in the case that luminaire height is less than ceiling height. First, we calculated "flux-unit" under the conditions of various luminaire height to organize the relationship between luminaire height and "flux-unit". Next, we focused on the difference between "flux-unit" of various luminaire height and the "flux-unit" of ceiling height(2.4m), to consider the correction formula by luminaire height.

As a result, we got the correction formula of "flux-unit" that correct "flux-unit" of ceiling height(2.4m) by luminaire height. The correction formula is as follows:

$$UF(H)=UF(2.4)-C(2.4^2-H^2)$$

$UF(H)$: "flux-unit" of luminaire height as H (lm), H : luminaire height(m)

$UF(2.4)$: "flux-unit" of luminaire height as 2.4(lm), C : constant

Furthermore, procedures of this new "Flux-unit method" were shown and one trial design with this method was also executed to verify brightness distribution by using a illuminance image. The result of verifying the usefulness of this method shows sufficient potential to be practical.

Consequently, it was shown that "Flux-unit method" is applicable to luminaires of various height under the limited applicable range used in this study.

(2016 年 7 月 19 日原稿受理, 2017 年 6 月 7 日採用決定)