昼光照明の簡易エネルギー評価手法の開発

A SIMPLIFIED METHOD FOR ESTIMATING THE REDUCTION
IN ANNUAL ELECTRIC POWER CONSUMPTION
FOR LIGHTING DUE TO DAYLIGHTING

山田 浩嗣*, 宿谷 昌則**

Hirotsugu YAMADA and Masanori SHUKUYA

This paper describes a method for estimating the decrease in annual electric power consumption for lighting due to daylighting. The proposed method is to use a chart for calculating annual mean daylight illuminance in a given room space and then to estimate the annual electric power consumption for lighting. The parameters included in the chart are window size, window orientation, room reflectance, and window types.

Annual electric power consumptions estimated using the proposed chart were found in good agreement with those calculated by detailed computer simulation.

keyword : daylighting ,electric lighting ,energy

昼光照明、電灯照明、エネルギー

1.はじめに

直射日光の入射する日除けのある窓からの室内昼光照明度の計算を可能にするために、直射日光率の理論が提案され、その妥当性が実測や数値解析により検証されてきた¹⁾。この計算法を用いた昼光照明のエネルギー評価によると、窓から得られる昼光の適切な導入によって照明用電力消費量の大幅な削減が期待できる²⁾。このような照明用電力消費量の解析には、照明計算に関する専門知識だけでなく計算機に関するそれも不可欠である。これらのことは、建築計画の特に初期段階における昼光照明の検討を困難にしている。建築照明計画といえども暗に電灯照明のみの計画を指し、昼光照明の計画は無視されることが多いが、そのような状況をいくらかでも改善するためには、建築計画の初期段階で利用し得る、昼光照明の簡易エネルギー評価手法の開発が必要である。本研究はその開発を目的とした。

2.室内昼光照明簡易計算手法

年間の照明用電力消費量は室内昼光照明度と電灯照明の方式によって決定される。そこではじめに室内平均昼光照明度を算出する方法を開発した。室内昼光照明度は窓面の大きさ・方位・室内平均反射率・日除けの光学的性質により算出される値であるので、本研究ではこれらパラメータの違いから室内平均昼光照明度を求めるための図表を作成した。なお、本研究では1日の最大照明度の年平均値が図表から算出できるようにした。

日最大室内昼光照明度の年平均値を算出するための図表の作成には、平均的な大・中・小規模の事務室³⁾を対象として、表1に示した条件について室内昼光照明度シミュレーションを行い¹⁾、その結果を解析・統合することにより、地域毎の図表を作成することにした。地域は東京・札幌・鹿児島を対象としたが、ここでは東京の場合について説明する。

本論文は、参考文献8)で報告したものを修正・加筆したものである。

* 東洋建設 修士(工学) (当時、武蔵工業大学
大学院)

** 武蔵工業大学工学部建築学科 教授・工博

TOYO Construction Co., Ltd., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.

図1は解析結果の一例である。この図はブラインドスラット角度の違いにより、どれだけ室内昼光照度に変化が現われるかを示しており、表1の条件の組み合わせによる約4000通りの計算結果を条件の違いごとにプロットしたものである。それぞれ回帰直線を最小2乗法を使って求めた結果が日最大室内昼光照度の年平均値を算出するための図表の一部となる。このような手続きを他のパラメータについても行い、それを統合して1つの計算図表を完成する。

図2は以上の方法に基づいて作成した日最大室内昼光照度の年平均値を算出するための図表例である。この計算図表例からは、水平ブラインド内付け片側採光窓による東京における日最大室内昼光照度の年平均値が算出できる。

計算手順は、図2の右下、経路図の太線矢印の示すとおりである。まず、左上の窓面と計算対象点の位置関係を表わす形態係数（立体角投射率）と室内昼光照度の関係を示す図から始まり、順に計算図表中に与えられた条件をなぞることにより、最終的に求めたい日最大室内昼光照度の年平均値を得る。

例えば、間口8m、室奥8m、天井高2.6m、窓面積10.2m² (6.0m×1.7m) の室において、窓面中央から2m離れた地点における昼光照度を表2に示した条件により計算する場合、まず窓面の形態係数を文献4) 等に

表1 シミュレーションの条件

形態係数	0.0~0.3
窓面方位	東・西・南・北
室内平均反射率	0.3、0.4、0.5
日除け	水平ブラインド内付け スラット角度 0°、30°、45°、60° スラット反射率 0.5、0.6、0.7

図1 解析結果例

図2 計算図表

より別途決定し（この場合0.10）、これを出発点として室内昼光照度の日最大年平均値は約400lxを得る。また、南向きの窓を北向きに変更したとすると、室内昼光照度の日最大年平均値が約150lx下がり、250lxとなることが直ちに読み取れる。このような計算条件の変更による照度の変化が簡単に読み取れることが本図表の利点と考える。

図2から窓面に近づくほど（形態係数が大きくなるほど）、南向きの窓になるほど、室内平均反射率が上がるほど、ブラインドスラット角度が小さくなるほど、スラット反射率が上がるほど室内昼光照度は大きくなることが分かる。

図2を使った室内昼光照度の推定の妥当性を確認するために、精算値との比較を行った。図3がその結果である。計算条件には形態係数・窓面方位・スラット角度などについて250の組み合わせについて検討した。ただし、形態係数などは表1に示した範囲内の値とした。相関係数は約0.97である。

なお、本研究における精算値とは、宿谷らによって文献5)において提案された直射日光率・天空光率・地表面反射率による室内昼光照度計算理論に基づき、計算された値をいう。またこの理論の妥当性は文献6)等によって検証されている。

3. 照明用消費電力量簡易計算手法

図4のプロットはある室における年平均照度の経時変化の一例である。これを2次曲線で近似したものが実線である。この2次曲線は時刻を t [h]、室内昼光照度の年平均値を E [lx] とし、

$$E = -a(t - t_0)^2 + E_{max} \quad (1)$$

ここで

E_{max} : 日最大室内昼光照度の年平均値 [lx];

t_0 : 日最大室内昼光照度の年平均値が生じる時刻 [h]。

この(1)式を応用して、2段階調光および連続調光方式⁷⁾による照明用電力消費量の計算方法を開発することにした。電灯照明への投入電力量は室内昼光照度と設計照度 E_0 との大小関係により決まる。そこで、日最大室内昼光照度の年平均値 E_{max} と E_0 の大小関係によって2つに場合分けして電力消費量を求めることにした。なお、簡単のため、 t_0 は必ず室使用時間帯の中心（例えば、室使用時間帯が9:00 - 17:00であれば、 $t_0 = 13$ ）に生じると仮定した。

i) $E_{max} \geq E_0$ の場合

図5は1日の室内昼光照度変動近似曲線とこの変動に応じて照明器具に投入される電力量を模式的に示し

表2 計算条件

計算地点	窓面から2m (0.10)
窓面の方位	南面
室内反射率	天井 0.7 壁 0.5 床 0.1 面積加重平均 0.44
日除け	水平ブラインド (内付け) スラット傾斜角 45° スラット反射率 0.7

図3 室内昼光照度の推定値と精算値との関係

図4 室内昼光照度変動の近似

たものである。最大室内昼光照度の年平均値 E_{max} が E_0 よりも大きいということは、室内の照度は昼光のみでまかなうことができる時間帯 T をもつということである。

2段階調光方式の場合、横軸を時間 t 、縦軸に照明器具への投入電力とすると、1日における照明器具への投入電力量は、図中の影をつけて示した長方形の面積となる。

一方、連続調光方式の場合、室内昼光照度の変動に応じて、図中の三角形の面積で表されるように投入電力が制御されると仮定すれば、連続調光方式の投入電力消費量は2段階調光方式の場合の $1/2$ となる。

図5を参考にして、2段階調光方式による1日の消灯時間 T は $t_1 - t_2$ となる。 t_1 、 t_2 はともに設計照度 E_0 が昼光のみで満たせる時刻を表わし、 E_0 が(1)式の E で与えられるとすれば、 T は次式で表すことができる。

$$T = t_1 - t_2 = 2\sqrt{\frac{E_{max} - E_0}{a}} \quad (2)$$

近似2次曲線(1)式における係数 a は2節に述べた計算機による解析結果によると、日最大室内昼光照度の年平均値 E_{max} と線形的な関係にある。一例を図6に示す。これは水平ブラインド内付けで東京の場合である。図6の関係を2.で示した計算図表と組み合わせれば、日最大室内昼光照度の年平均値 E_{max} を算出し、さらに係数 a を求めることができることになる。

例えば、2.に示した計算例では E_{max} は400lxであったので、係数 a は図6から15となる。設計照度を300lxとすると、1日の消灯時間は(2)式から約5時間と計算される。

2段階調光方式の場合の年間照明用電力消費量 A_E は、電灯照明の投入電力 K_W を与条件とすれば以下のように表せる。

$$A_E = K_W \times (T_0 - T) \times D \quad (3)$$

ここで

A_E : 単位床面積当たりの照明用電力消費量
[J/m²/year]

K_W : 蛍光灯照明器具の安定器への単位床面積当たりの投入電力 [W/m²]

T_0 : 1日における室使用時間 (単位は秒) [s/日]

T : 1日に消灯可能な時間 [s/日]

D : 年間の室使用日数 [日]

式(3)で $(T_0 - T)$ が負となる場合があるが、これは1日の室使用時間より昼光のみで設計照度を満たせる時間のほうが長いことを意味する。

図5 昼光照度の変動と電力消費パターンのモデル化 ($E_{max} \geq E_0$)

図6 E_{max} と係数 a の関係

図7 昼光照度の変動と電力消費パターンのモデル化 ($E_{max} < E_0$)

したがって $(T_0 - T) < 0$ のとき $(T_0 - T) = 0$ とする。

一方、連続調光方式における年間照明用電力消費量 A_E' は以下のように表すことにする。

$$A_E' = k \times A_E \quad (4)$$

前述のように、 T_0 が t_0 を中心とした時間帯であると仮定したので k は $1/2$ となる。

ii) $E_{max} < E_0$ の場合

図7は、図5と同様に1日の室内昼光照度変動とそ
のときの照明器具に投入される電力量を模式的に示し
たものである。2段階調光方式の場合、室内昼光照度
が設計照度 E_0 に1日中満たないため、蛍光灯は終日
点灯となり、 $T=0$ となる。照明器具への投入電力は
図中の影をつけて示した長方形の面積となる。

一方、連続調光方式の場合には室内昼光照度は設計
照度に満たない場合でも、設計照度が満たされるよう
に昼光照度に応じて調光を行い、図7中の連続調光の
場合の影をつけて示した面積のように1日の投入電力
量を変化させるものとする。この面積は2段階調光方
式における1日の投入電力量を1として $E_0/(E_0 + E_{max})$
で表すことにする。

2段階調光方式の場合の年間照明用電力消費量 A_E
は、

$$A_E = K_w \times T_0 \times D \quad (5)$$

一方、連続調光方式の年間照明用電力消費量 A_E' は

$$A_E' = k \times A_E \quad (6)$$

$$k = \frac{E_0}{E_0 + E_{max}} \quad (7)$$

係数 k と E_{max} の関係を、i) と ii) の双方の場合に
ついてまとめて図8に示す。

以上を示した照明用電力消費量の計算手法の妥当性
を確認するために、照明用電力消費量の計算機による
精算値との比較を行った。図9は2段階調光方式の場
合の精算値と簡易計算値の相関を示したものである。
計算条件は図2が適用できる60条件とした。相関係数
は0.92であり、十分な精度であると考えられる。

この計算手法の信頼区間を明らかにするために、精
算値と簡易計算値の残差の分析を行った。図10は残差
の度数分布である。残差の平均値は0.2、標準偏差は
9.5であった。図10の残差分布を正規分布とみなすと、
照明用電力消費量の推定値 A_E の95%信頼区間は A_E
 $\pm 20 \text{ MJ/m}^2/\text{year}$ となる。なお棄却される5%はスラ
ット角度が 0° で室奥行は3mしかないような条件であ
ることが分かった。

連続調光方式についても同様の比較検討を行った結

図8 E_{max} と係数 k の関係

図9 年間照明用電力消費量の簡易計算値と
精算値との比較（2段階調光方式）

図10 年間照明用電力消費量の簡易計算値と
精算値の残差の度数分布（2段階調光方式）

果をそれぞれ図11、図12に示す。精算値と簡易計算値の相関係数は0.80、残差の平均値は-4.3、標準偏差は13.4となった。図12から残差の中央値が約-10MJ/m²/yearずれることがわかる。これは、電力消費量の推定値が計算機による精算値よりも全体的に常に約10MJ/m²/year大きめになる傾向がみられることを示している。この傾向は、簡易計算法が精算法に対してもつ偶然誤差ではなく、系統誤差である。

4.まとめ

昼光照明の簡易エネルギー評価の計算手法の開発を行った。その結果、

- 1) 1日の最大室内昼光照明度の年平均値を窓面方位・室内平均反射率・窓システムの種類等の関数として表し、これを図表としてまとめることができた。
- 2) 室内昼光照明度の経時変化を2次関数として表現し、関数の中に現われる定数を日最大室内昼光照明度の年平均値と関係づけることができた。
- 3) 1)と2)の結果を総合して、年間照明用電力消費量を予測する計算手法を開発した。
- 4) 簡易計算手法の適用範囲と信頼性を確認するために計算機による年間照明用電力消費量の精算値との比較により検証を行った。東京で窓面に水平ブラインド内付けがあつて、2段階調光方式の場合の年間照明用電力消費量の推定値は、95%信頼確率で±20MJ/m²/year以下の誤差で予測可能であることが明らかになった。また、東京で窓面に水平ブラインド内付けがあつて、連続調光方式の場合の電力消費量の推定値は、計算機による精算値よりも全体的に約10MJ/m²/year大きめになる傾向が見られた。

以上のことから、本研究で開発した簡易計算手法は、2段階調光方式の場合には、十分な精度を有していると考えられる。また、連続調光方式の場合にあつても、上述の系統誤差を考慮するならば、十分に使用可能と考えられる。

【参考文献】

- 1) 宿谷昌則：光と熱の建築環境学、丸善、1993、pp.129-159.
- 2) 宿谷昌則：建築環境学1（木村建一編）、丸善、1992、pp.35-66.
- 3) 梅田和彦、宿谷昌則：自然照明・自然換気と事務所建築エネルギー消費に関する数値解析、日本建築学会大会講演梗概集、1992、pp.1065-1066.

図11 間照明用電力消費量の簡易計算値と精算値との比較（連続調光方式）

図12 年間照明用電力消費量の簡易計算値と精算値の残差の度数分布（連続調光方式）

- 4) 日本建築学会編：建築設計資料集成1 環境、丸善、1978、pp.81-82、pp.101.
- 5) 宿谷昌則、木村建一：反射ルーバーまたはベネシャンブラインドのある窓からの直射日光を含む昼光による室内照度の計算理論、日本建築学会論文報告集 第321号、1982、pp.108-116.
- 6) 八田次郎、野谷昌克、大橋清文、宿谷昌則：直射日光率を用いた室内昼光照明度計算法の実用性の検討、日本建築学会大会講演梗概集、1991、pp.59-60.
- 7) 砂田竜男、宿谷昌則：昼光照明の省エネルギー効果に関する数値解析、日本建築学会大会講演梗概集、1990、pp.785-786.
- 8) 山田浩嗣、宿谷昌則：昼光照明の簡易エネルギー評価に関する開発、日本建築学会大会講演梗概集、1995、pp.547-548.

（1995年4月5日原稿受理、1995年10月18日採用決定）