相互反射法による室内照明計算法

専門会員 石野 幸三* 正会員 飯塚 昌之*

On the Method of Calculating Illumination by Interreflections

Kōzō Ishino (Fellow Member), Masayuki Iizuka (Member)

(Department of Electrical Engineering, Nagoya Institute of Technology)

ABSTRACT

In making the design of interior lighting system, there are many cases in which the average illumination on the work plane becomes a subject of discussion, in accordance with lumen method which uses the idea of interreflections; besides, of interior interreflections, many studies have hitherto been made, but they have remained a mathematical analysis of integral equations under various conditions.

The authors attempt in this paper, to make a general remark on such a method of calculating illumination as follows: Availing itself of the fact that the luminous group that makes interreflections can be represented by electric networks, the calculation is made by the luminous analogue computer; the luminosity of each surface element, which constitutes the interreflection group, simulating electric potential; coefficients, which represent both the reflection rate of each surface element and the luminous flux transfer between respective surface elements, simulating electric resistance; and the authors make a detailed study of the method of calculating illumination, in which the luminous analogue computer is made use of. That is, noticing the luminosity ratio of both the cylindrical room and the rectangular one within the range of an idealized room, and researching into this ratio, as compared with the data that have ever been published, the authors have carried out the experiment by the luminous analogue computer with a view to investigating the possibility of the equivalent replacement between the cylindrical room and the rectangular one (through the application of room coefficient k_r); and obtained such a result as is mentioned in this paper.

Authors also described the effect of no. of wall section and the calculating method of the utilization factor U' .

1. ま え が き

相互反射法による照明計算法としては、1916年、Harrison と Anderson¹⁾ が模型実験によって照明率を決定し、以来これが広く室内照明計算法に用いられてきた。しかしこの資料は応用範囲が限定されていたので、Buckley²⁾、山内³⁾、久野⁴⁾、Hottell & Keller⁵⁾ らが、積分方程式を用いた計算法を試み、さらに1941年に Parry Moon⁶⁾ がこの方法を普遍化し、数値計算もできるようになって、多数の計算された資料が発表された。その結果模型実験で求められたよりもはるかに広範囲の、室の形状および反射率を有する室内に対して応用できるようになった。しかし計算がめんどうであり、非対

称室の場合には利用できない。Moon の積分方程式においては、式中の核 (Kernel) の計算がめんどうなため、指数関数で近似しているので、多少の誤差をまぬがれない。

この核の正確な値は、1952年に Hamilton と Morgan⁷⁾ が、熱放射授受について計算し、この結果が Shape Modulusとしてそのまま照明系にも応用できるようになった。1955年 O'Brien⁸⁾ はこの Shape Modulus の値を用い、相互反射をなす照明系を、電気回路網によって表わす方法を考え、Luminous Analogue Computer (以下 L. A. C. と略称) を発明した。その原理は相互反射系が電気回路によって表現されることから、相互反射系を構成する各面素の光束発散度を電位に、各面素の反射率および各面素間の光束授受を表わす Shape Modulus

* 名古屋工業大学電気工学教室

を抵抗値におきかえ、相互反射系の解析をかなりの精度で簡単に行なわんとするものである。

なお相互反射による室内照明の計算においては、室内には机その他の什器が全くなく、また室の表面が完全拡散面で、側壁の光束発散度は、まわりの位置に無関係に、高さだけの関数であるような理想化室の場合について普通計算されているが、実際には机その他の什器がおかれ、什器の側面と床との間の、いわゆる Cavity (または Lightwell) におけるところの相互反射に基づく、Cavity の開口部の等価反射率なるものを考慮する必要がある、計算はかなり複雑なものとなってくる。本報文においては、相互反射法による計算に L.A.C. を利用し、まず面素数を少なくして計算を楽にするため、 k_r を等しくして、矩形室を等価な円筒室におきかえた場合の誤差の問題、円筒室の側面を分割した場合の光束発散度比に及ぼす影響や誤差の問題、作業面上の有効反射率を計算して、作業面上の固有照明率を L.A.C. により求める方法などについて報告する。

2. L.A.C. の原理と構造

L.A.C. は、カリフォルニア大学電気工学科 P. F. O'Brien⁹⁾ の発明によるもので、わが国では電気試験所大阪支所⁹⁾ で試作された。この計算機によれば、照明系ばかりでなく、熱放射系の相互反射も簡単に計算され、その原理は、相互反射系が、多元連立一次方程式によって表現される¹⁰⁾ ことから、相互反射系を構成する各面素の光束発散度を電位に、各面素の反射率および各面素間の光束授受を表わす Shape Modulus を、それぞれ抵抗値におきかえ、相互反射系の解析を行なわんとするものである。

L.A.C. の原理については、すでに述べた報文⁹⁾ があるので、ここでは筆者らが計算に使用した L.A.C. の仕様についてだけ、その概要を述べる。

外観は第 1 図に示し、その内部接続を第 2 図に示

第 1 図 L.A.C. の外観

す。回路用、ホイートストンブリッジおよび直流電位差計用電源には、D.C. 2 V, 500 mA の安定化電源を使

第 2 図 L.A.C. の内部接続

用し、初期光束発散度調整用抵抗 $R_{01} \sim R_{012}$ には $1 \text{ k}\Omega$ 面反射抵抗 $R_{1G} \sim R_{12G}$ と $R_{1F} \sim R_{12F}$ には $100 \text{ k}\Omega$ と $1 \text{ k}\Omega$ 、比幾何学的抵抗 $R_{1-2} \sim R_{11-12}$ には $100 \text{ k}\Omega$ の多回転ポテンショメータをそれぞれ使用している。またホイートストンブリッジは横河製 BD-1 で、有効数字 5 桁まで測定でき、直流電位差計は同じく横河製精密級 P-1 で、測定範囲 $0 \sim 1.6 \text{ V}$ 、総合精度 $\pm(0.05\% + 20 \mu\text{V})$ 、検流計は東亜電波工業の電子管式 AD-7 型で、感度 $3 \times 10^{-8} \text{ V}$ のものを使用している。

3. 矩形室と円筒室の等価的な置きかえ

理想化室において、矩形室を等価的に円筒室におきかえることが可能であれば、L.A.C. を使用するにあたり、面素数が少なくなつて、きわめて好つづうとなる。この可能性については、すでに報告¹¹⁾ されているが、筆者たちは別の見地からこの問題を詳細に検討した。

まず理想化室として、次の仮定を設ける。

- (1) すべての面は完全拡散面である。
- (2) 壁面の光束発散度は、室をめぐる位置に無関係である。
- (3) 各面の反射率は一様である。
- (4) 光束は室内の媒体により吸収されたり、散乱されたりしない。
- (5) 室内には何物もおかれていない。

(6) Room Coefficient $k_r = \frac{h(w+L)}{2wl} = \frac{hp^*}{4S}$ を使用する。

既報¹¹⁾の論文においては、矩形室を等価な円筒室におきかえるに当たり、高さ h を同一として矩形室と面積の等しい円筒室におきかえているが、筆者らは、照明率が等しくなるような置きかえをするために、Room Coefficient (Domance とおいう) k_r に注目し、これが等しくなるような置きかえをした。

第 3 図 図中実線は矩形室を示し、小さい丸は円筒室を示す。

計算の結果は、光天井 (天井面照明) に対し、第 3 図 (a), (b), (c) に示し、図中実線は矩形室、小さい黒い●は円筒室を示す。また (a) 図は天井面光束発散度比 (L_c/L_{oc})**, (b) 図は壁面光束発散度比 (L_w/L_{oc})**, (c) 図は

床面光束発散度比 (L_f/L_{oc})** を表わす。

第 3 図における Boast¹²⁾ の値は、積分方程式の数値解より求めたもので、同一の k_r については、矩形室も円筒室も共通である。なお壁面は微小幅 dt で分割し、0 から h まで積分しているの、壁面分割を考慮している。この Boast の計算式は、Moon⁹⁾ の公式と同一のものであって、下記に示すようなものである。

$$B_w(s) = B_{ow}(s) + \rho_w \left[\int_0^h K_{ww}(s-t) \cdot B_w(t) dt + K_{cw}(s) \cdot B_c + K_{fw}(s) \cdot B_f \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$B_c = B_{oc} + \rho_c \left[\int_0^h K_{wc}(t) \cdot B_w(t) dt + K_{fc}(h) \cdot B_f \right] \dots\dots\dots (2)$$

$$B_f = B_{of} + \rho_f \left[\int_0^h K_{wf}(t) \cdot B_w(t) dt + K_{cf}(h) \cdot B_c \right] \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

$B_w(s)$: 天井面より下へ距離 s での壁面光束発散度

$B_w(t)$: 天井面から下へ距離 t での壁面光束発散度

B_c, B_f : 天井面または床面の光束発散度

$B_{ow}(s)$: 天井面より下へ、距離 s での初期壁面光束発散度

B_{oc}, B_{of} : 天井面または床面の初期光束発散度

$K_{ww}(s-t)$: 天井面より下へ t の位置にある発光帯 (単位光束発散度、単位幅) により、天井面から s の距離のところに生ずる平均壁面照度

$K_{wc}(t), K_{wf}(t)$: 天井面より下へ t の位置にある発光帯により天井面または床面に生ずる平均照度

$K_{cw}(s), K_{fw}(s)$: 天井面または床面の単位光束発散度により、天井面から s の距離において生ずる壁面の平均照度

$K_{cf}(h), K_{fc}(h)$: 天井面または床面の単位光束発散度により、床面または天井面に生ずる平均照度

上記 $K_{ww}, K_{wc}, K_{wf}, K_{cw}, K_{fw}, K_{cf}, K_{fc}$ は積分方程式の核と呼ばれるもので、(1), (2), (3) 式の解を求めるために、これを関数で近似させている。

また第 3 図における O'Brien⁹⁾ の値は、矩形室について、対称矩形室についての Transfer Functions の表に基づき、Digital Computer (I. B. M. 709) で、小数点以下 4 桁まで計算されたもので、壁面分割は考慮されていない。O'Brien の値は筆者らの L. A. C. により計算されたもの〔円筒室 (3 面)、矩形室 (6 面) — 壁面分割なし〕と多少値の異なるものもあるが、大体同じ傾向にあると考えられる。

k_r が大きく、天井面と壁面の反射率の高い場合には、Boast の値と差 (絶対誤差) が大きいけれども、その他

* この式において h : へやの高さ, w : へやの幅, l : へやの長さ, p : へやの周囲長, S : へやの断面積である。従来わが国では Room Index $R = \frac{wl}{H(w+l)}$ (H : 作業面から光源までの高さ) が多く使用されてきた。

** L_{oc} : 天井面初期光束発散度, L_c : 相互反射後の天井面光束発散度, L_w : 相互反射後の壁面光束発散度, L_f : 相互反射後の床面光束発散度

の場合には差が少なく、等価的なおきかえが可能である。また k_r が大きく、天井面と壁面の反射率が高い場合については、次節 4 で述べるように、円筒室で光天井（天井面照明）の場合、壁面分割数を増すことにより、差を少なくすることができる。したがっていずれの場合においても、矩形室を k_r が等しくなるような（照明率の全く等しい）円筒室におきかえることが可能であり、円筒室におきかえれば、たとえ壁面分割をしても、面素数が減少して計算が簡単化され、精度も小数点以下 2 桁まではほぼ一致している。

4. 円筒室における壁面分割の影響

円筒室，光天井の場合， $k_r = hp/4S = 1.0$ において，壁面を 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 分割し，各面の光束発散度比を L. A. C. で計算した結果は，天井面光束発散度比が第 4 図，床面光束発散度比が第 5 図のようになる（壁面光束発散度比は壁面分割数にはあまり影響されず，双曲線

第 4 図 円筒室（光天井）

第 5 図 円筒室（光天井）

第 6 図 円筒室（光天井）

第 7 図 円筒室（光天井）

第 8 図 円筒室（光天井）壁面 10 分割

関数的に減少する）。天井面，壁面の反射率が高くても，分割数が 3 以上にすれば， $k_r = 1.0$ では Boast¹²⁾ の計算値とよく一致し， $k_r = 1.5, 2.0$ では分割数をさらに増す必要のあることがわかった。この詳細は第 6 図，第 7 図，第 8 図に示す。また計算値を第 1 表 (a)，(b)，(c)，第 2 表 (a)，(b) に示し， $k_r = 1.0$ に対し壁面分割数が 3 以上では L_c/L_{oc} ， L_f/L_{oc} が Boast の値に収束しており，壁面光束発散度比 $L_w(s)/L_{oc}^*$ は，Wiseman の積分方程式¹³⁾の数値解とよく一致している。

第 8 図の $L_w(s)/L_{oc}$ は，比較する Boast** の計算値が無いため，下記のような Wiseman¹³⁾ の積分方程式解（数値は第 3 表 (a)，(b) 参照）を利用した。

Wiseman の積分方程式解（光天井の場合）は

$E(t)$: 天井より距離 t 下の仮想面の上面の平均照度

L_{oc} : 天井面の平均初期光束発散度

L_e : 天井面の平均光束発散度

L_f : 床面の平均光束発散度

$L_w(s)$: 天井面から距離 s の点における壁面の平均光束発散度

ρ_w, ρ_c, ρ_f : 壁面，天井面，床面の反射率

とすれば，次のようになる。

* $L_w(s)$: 天井から下へ距離 s の位置における壁面の光束発散度

** 壁面光束発散度比として $L_w(T)/L_{oc}$ ， $L_w(M)/L_{oc}$ だけ発表されている。ただし $L_w(T)$ は壁面上端， $L_w(M)$ は壁面中央の光束発散度である。

第 1 表(a) L. A. C. による光束発散度比 (壁面分割の影響) 円筒室, 光天井, $\rho_c = \rho_w = 0.8$ $k_r = 1.0$ の場合

壁面分割数 ρ_f		分割なし	2 分割	3 分割	4 分割	5 分割	6 分割	8 分割	10 分割
光束 発散度比 L_c/L_{oc}	0.1	1.289	1.339	1.353	1.352	1.355	1.355	1.359	1.356
	0.3	1.345	1.390	1.403	1.402	1.403	1.405	1.408	1.405
	0.5	1.415	1.453	1.464	1.463	1.460	1.467	1.469	1.466
L_f/L_{oc}	0.1	0.057	0.054	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.052
	0.3	0.188	0.180	0.177	0.176	0.171	0.176	0.175	0.175
	0.5	0.349	0.333	0.330	0.328	0.313	0.329	0.328	0.327
L_{w1}/L_{oc}	0.1	0.420	0.557	0.623	0.461	0.659	0.668	0.688	0.693
	0.3	0.478	0.604	0.668	0.685	0.702	0.713	0.731	0.737
	0.5	0.550	0.663	0.724	0.740	0.752	0.768	0.784	0.791
L_{w2}/L_{oc}	0.1		0.312	0.413	0.487	0.532	0.564	0.606	0.627
	0.3		0.374	0.466	0.536	0.577	0.610	0.651	0.671
	0.5		0.451	0.530	0.596	0.631	0.667	0.706	0.726
L_{w3}/L_{oc}	0.1			0.276	0.361	0.422	0.467	0.534	0.560
	0.3			0.341	0.417	0.471	0.517	0.581	0.606
	0.5			0.420	0.486	0.531	0.579	0.638	0.663
L_{w4}/L_{oc}	0.1				0.258	0.330	0.381	0.458	0.503
	0.3				0.324	0.386	0.436	0.508	0.551
	0.5				0.405	0.453	0.503	0.569	0.610
L_{w5}/L_{oc}	0.1					0.249	0.302	0.394	0.447
	0.3					0.313	0.363	0.447	0.497
	0.5					0.391	0.438	0.513	0.559
L_{w6}/L_{oc}	0.1						0.249	0.330	0.401
	0.3						0.317	0.387	0.453
	0.5						0.401	0.459	0.517
L_{w7}/L_{oc}	0.1							0.283	0.349
	0.3							0.346	0.405
	0.5							0.424	0.475
L_{w8}/L_{oc}	0.1							0.236	0.307
	0.3							0.305	0.367
	0.5							0.390	0.441
L_{w9}/L_{oc}	0.1								0.265
	0.3								0.329
	0.5								0.409
L_{w10}/L_{oc}	0.1								0.226
	0.3								0.296
	0.5								0.383

$$\begin{aligned}
 E(t) = & L_c \cos h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r (t/h) \\
 & - L_{oc} G[2(1-\rho_w)^{1/2} \sin h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r \\
 & + [2-\rho_w(1+\rho_f)] \cos h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r] \\
 & \times \sin h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r (t/h) \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_w(s) = & B_2 \cos h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r (s/h) \\
 & + C_2 \sin h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r (s/h) \dots\dots\dots(5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_c = & L_{oc} G[2-\rho_w(1+\rho_f)] \sin h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r \\
 & + 2(1-\rho_w)^{1/2} \cos h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r] \dots\dots\dots(6)
 \end{aligned}$$

$$L_f = 2\rho_f L_{oc} G(1-\rho_w)^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 G = & [2(1+\rho_c\rho_f) - \rho_w(1+\rho_c)(1+\rho_f)] \\
 & \times \sin h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r + 2(1-\rho_w)^{1/2}(1-\rho_c\rho_f) \\
 & \times \cos h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r]^{-1}
 \end{aligned}$$

$$B_2 = \rho_w L_{oc} G[1-\rho_f] \sin h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r$$

$$+ (1-\rho_w)^{1/2}(1+\rho_f) \cos h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r]$$

$$\begin{aligned}
 C_2 = & -\rho_w L_{oc} G[(1-\rho_f) \cos h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r \\
 & + (1-\rho_w)^{1/2}(1+\rho_f) \sin h \, 2(1-\rho_w)^{1/2} k_r]
 \end{aligned}$$

$$L_{ow} = L_{of} = 0$$

$$L_{oc} \approx 0$$

$$k_r = \frac{hp}{4S}$$

L. A. C. では, 円筒室だけについて壁面分割の問題を検討したが, 同じく矩形室についても壁面分割をする場合, 面数が多くなり, 一般的な方法では計算できない場合がある. しかし対称矩形室で壁面分割を行なう場合, 天井から壁, 壁から壁, 床から壁への Shape Modulus に注目し, これらの各面素に関して代数和を考えると, 円筒室と同様にして計算が可能で, 現在この方法で検討を

第1表(b) L.A.C. による光束発散度比(壁面分割の影響)
円筒室, 光天井, $\rho_c = \rho_w = 0.8$ $k_r = 1.5$ の場合

光束 発散度比 ρ_f	壁面分割数				
	分割なし	2 分割	3 分割	5 分割	10 分割
L_c/L_{oc}	0.1	1.267	1.345	1.368	1.389
	0.3	1.301	1.371	1.393	1.412
	0.5	1.336	1.402	1.422	1.438
L_f/L_{oc}	0.1	0.047	0.038	0.037	0.035
	0.3	0.143	0.126	0.122	0.117
	0.5	0.260	0.230	0.224	0.215
L_{w1}/L_{oc}	0.1	0.358	0.514	0.587	0.718
	0.3	0.395	0.539	0.609	0.737
	0.5	0.437	0.568	0.635	0.760
L_{w2}/L_{oc}	0.1		0.243	0.355	0.627
	0.3		0.280	0.383	0.646
	0.5		0.325	0.416	0.668
L_{w3}/L_{oc}	0.1			0.204	0.527
	0.3			0.244	0.548
	0.5			0.291	0.573
L_{w4}/L_{oc}	0.1				0.234
	0.3				0.268
	0.5				0.308
L_{w5}/L_{oc}	0.1				0.175
	0.3				0.217
	0.5				0.267
L_{w6}/L_{oc}	0.1				0.328
	0.3				0.355
	0.5				0.387
L_{w7}/L_{oc}	0.1				0.277
	0.3				0.308
	0.5				0.344
L_{w8}/L_{oc}	0.1				0.233
	0.3				0.267
	0.5				0.308
L_{w9}/L_{oc}	0.1				0.193
	0.3				0.231
	0.5				0.277
L_{w10}/L_{oc}	0.1				0.157
	0.3				0.200
	0.5				0.252

第1表(c) L.A.C. による光束発散度比(壁面分割の影響)
円筒室, 光天井, $\rho_c = \rho_w = 0.8$ $k_r = 2.0$ の場合

光束 発散度比 ρ_f	壁面分割数				
	分割なし	2 分割	3 分割	4 分割	8 分割
L_c/L_{oc}	0.1	1.237	1.329	1.349	1.381
	0.3	1.258	1.344	1.364	1.393
	0.5	1.282	1.360	1.379	1.407
L_f/L_{oc}	0.1	0.036	0.028	0.027	0.026
	0.3	0.115	0.093	0.090	0.085
	0.5	0.206	0.168	0.163	0.155
L_{w1}/L_{oc}	0.1	0.309	0.467	0.530	0.599
	0.3	0.333	0.481	0.542	0.609
	0.5	0.361	0.497	0.557	0.622
L_{w2}/L_{oc}	0.1		0.192	0.301	0.373
	0.3		0.216	0.318	0.386
	0.5		0.244	0.337	0.401
L_{w3}/L_{oc}	0.1			0.162	0.232
	0.3			0.188	0.249
	0.5			0.218	0.270
L_{w4}/L_{oc}	0.1				0.136
	0.3				0.163
	0.5				0.194
L_{w5}/L_{oc}	0.1				0.257
	0.3				0.273
	0.5				0.291
L_{w6}/L_{oc}	0.1				0.199
	0.3				0.217
	0.5				0.239
L_{w7}/L_{oc}	0.1				0.151
	0.3				0.174
	0.5				0.201
L_{w8}/L_{oc}	0.1				0.110
	0.3				0.139
	0.5				0.173

進めている。

矩形室 (壁面分割) $\left\{ \begin{array}{l} \text{一般的な方法による L.A.C. の面数} \\ = 2(2n+1), n \geq 1 \\ \text{対称性を利用したときの L.A.C. の面数} \\ = n+2, n \geq 1 \end{array} \right.$

ただし n : 壁面分割数

さらに一般的には, 面数の多少にかかわらず, Digital Computer で計算できる. O'Brien⁹⁾ は, 非対称室について, 壁面の一面だけを分割し, 10 面として計算している。

5. 作業面上の平均照度ならびに固有照明率の計算

3, 4 では, 作業面を考慮せず, 天井面, 壁面 (または

側面), 床面についての光束発散度比を求めた。一般に L.A.C. では, 床面上任意の高さの所に作業面を考えた場合の固有照明率 U' は求めることができない。しかしこれでははなはだ不便であるので, 筆者らは次のような方法で作業面上の照度ならびに固有照明率を求めた。

いま第 9 図において, 作業面以下を Cavity (または Lightwell¹⁴⁾) と考え, 作業面に対する入射光束 F_{in} が, この中で相互反射され, Cavity から外へ (上方へ) 出る光束を F_{out} とすれば, 作業面上の有効反射率 (等価反射率) ρ_{eff} は

$$\rho_{eff} = \frac{F_{out}}{F_{in}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わされるので, この ρ_{eff} を用い, 作業面から上の室内について, L.A.C. で相互反射を計算すれば, 作業

第 2 表(a) L. A. C. による光束発散度比 (壁面 10 分割の場合) 円筒室, 光天井 $k_r=1.0$

光束 発散度比		0.8				0.5			
		0.8				0.5			
		0.8	0.5	0.3	0.1	0.8	0.5	0.3	0.1
0.1	L_c/L_{oc}	1.356	1.149	1.076	1.024	1.196	1.088	1.045	1.014
	L_f/L_{oc}	0.052	0.030	0.023	0.019	0.046	0.029	0.022	0.018
	L_{w1}/L_{oc}	0.693	0.312	0.162	0.047	0.611	0.296	0.157	0.046
	L_{w2}/L_{oc}	0.627	0.270	0.136	0.039	0.553	0.255	0.132	0.039
	L_{w3}/L_{oc}	0.560	0.230	0.113	0.032	0.494	0.218	0.110	0.031
	L_{w4}/L_{oc}	0.503	0.199	0.095	0.026	0.444	0.188	0.092	0.026
	L_{w5}/L_{oc}	0.447	0.169	0.079	0.021	0.394	0.160	0.076	0.021
	L_{w6}/L_{oc}	0.401	0.144	0.065	0.017	0.353	0.137	0.063	0.017
	L_{w7}/L_{oc}	0.349	0.123	0.055	0.014	0.307	0.116	0.053	0.014
	L_{w8}/L_{oc}	0.307	0.106	0.046	0.011	0.271	0.100	0.045	0.011
0.3	L_{w9}/L_{oc}	0.265	0.089	0.039	0.009	0.233	0.084	0.038	0.009
	L_{w10}/L_{oc}	0.226	0.078	0.034	0.009	0.199	0.074	0.033	0.008
	L_c/L_{oc}	1.405	1.165	1.085	1.030	1.219	1.096	1.051	1.018
	L_f/L_{oc}	0.175	0.096	0.072	0.057	0.152	0.090	0.070	0.057
	L_{w1}/L_{oc}	0.737	0.321	0.164	0.048	0.639	0.302	0.159	0.046
	L_{w2}/L_{oc}	0.671	0.278	0.139	0.040	0.582	0.262	0.134	0.039
	L_{w3}/L_{oc}	0.606	0.239	0.116	0.032	0.526	0.225	0.112	0.032
	L_{w4}/L_{oc}	0.551	0.208	0.098	0.027	0.478	0.196	0.095	0.026
	L_{w5}/L_{oc}	0.497	0.179	0.082	0.022	0.431	0.169	0.080	0.021
	L_{w6}/L_{oc}	0.453	0.156	0.069	0.018	0.393	0.147	0.067	0.017
0.5	L_{w7}/L_{oc}	0.405	0.136	0.059	0.015	0.351	0.128	0.058	0.015
	L_{w8}/L_{oc}	0.367	0.120	0.052	0.013	0.318	0.113	0.050	0.013
	L_{w9}/L_{oc}	0.329	0.106	0.045	0.011	0.286	0.100	0.044	0.011
	L_{w10}/L_{oc}	0.296	0.097	0.042	0.010	0.257	0.091	0.041	0.010
	L_c/L_{oc}	1.466	1.183	1.094	1.036	1.248	1.106	1.056	1.022
	L_f/L_{oc}	0.327	0.168	0.124	0.097	0.278	0.157	0.119	0.095
	L_{w1}/L_{oc}	0.791	0.330	0.167	0.049	0.673	0.309	0.161	0.048
	L_{w2}/L_{oc}	0.726	0.287	0.142	0.040	0.618	0.269	0.137	0.040
	L_{w3}/L_{oc}	0.663	0.249	0.119	0.033	0.564	0.233	0.115	0.032
	L_{w4}/L_{oc}	0.610	0.218	0.102	0.027	0.519	0.204	0.098	0.027
	L_{w5}/L_{oc}	0.559	0.190	0.086	0.022	0.476	0.178	0.083	0.022
	L_{w6}/L_{oc}	0.517	0.168	0.073	0.018	0.440	0.157	0.071	0.018
	L_{w7}/L_{oc}	0.475	0.150	0.064	0.016	0.404	0.140	0.062	0.016
	L_{w8}/L_{oc}	0.441	0.136	0.058	0.014	0.376	0.127	0.056	0.014
	L_{w9}/L_{oc}	0.409	0.124	0.052	0.012	0.348	0.116	0.050	0.012
	L_{w10}/L_{oc}	0.383	0.118	0.050	0.012	0.326	0.110	0.048	0.012

面上の照度ならびに固有照明率を簡単に求めることができる。筆者らはこの方法 (Cavity Method) を利用して計算し, Boast の値にきわめて近い値を得たが, その結果については, 紙数のつごうで資料として報告したい。なお ρ_{eff} に対する計算式は多数発表されているが¹⁵⁾, 筆者らはこの ρ_{eff} を L. A. C. で計算することを目下検討している。

6. 結 言

以上述べたように, 筆者たちは L. A. C. で相互反射による光束発散度比を求めるに当たり, 面素数を少なくして計算を簡単にするため, 矩形室を等価な円筒室におきかえることを検討し, この置きかえにあたっては, 照明率が等しくなるように, k_r が等しくなるような置きかえをした。そして計算の結果, k_r が小さい場合に

第 9 図

Boast の計算値とよく一致し, また k_r が大きく, 天井, 壁の反射率が高い場合にも, 円筒室の壁面分割数を増すことにより, 誤差を少なくすることができることを

第2表(b) L.A.C. による光束発散度比(壁面10分割の場合)円筒室, 光天井 $k_r=1.5$

0.8				0.5			
		0.8	0.5	0.3	0.1	0.8	0.5	0.3	0.1
光束 発散度比									
L_c/L_{oc}	0.1	1.389	1.148	1.069	1.016	1.087	1.212	1.042	1.010
L_f/L_{oc}		0.035	0.017	0.012	0.010	0.031	0.016	0.012	0.010
L_{w1}/L_{oc}		0.718	0.308	0.158	0.046	0.626	0.292	0.154	0.046
L_{w2}/L_{oc}		0.627	0.245	0.120	0.034	0.547	0.232	0.117	0.033
L_{w3}/L_{oc}		0.527	0.192	0.090	0.024	0.460	0.182	0.088	0.024
L_{w4}/L_{oc}		0.452	0.153	0.069	0.018	0.394	0.145	0.067	0.018
L_{w5}/L_{oc}		0.386	0.122	0.053	0.013	0.337	0.115	0.051	0.013
L_{w6}/L_{oc}		0.328	0.097	0.040	0.010	0.286	0.092	0.039	0.010
L_{w7}/L_{oc}		0.277	0.078	0.032	0.007	0.242	0.074	0.031	0.007
L_{w8}/L_{oc}		0.233	0.063	0.025	0.006	0.204	0.060	0.024	0.006
L_{w9}/L_{oc}	0.3	0.193	0.051	0.020	0.005	0.168	0.048	0.019	0.005
L_{w10}/L_{oc}		0.157	0.041	0.016	0.004	0.137	0.039	0.016	0.004
L_c/L_{oc}		1.412	1.153	1.072	1.018	1.223	1.090	1.043	1.011
L_f/L_{oc}		0.117	0.054	0.039	0.030	0.102	0.051	0.038	0.030
L_{w1}/L_{oc}		0.737	0.311	0.159	0.047	0.639	0.294	0.155	0.046
L_{w2}/L_{oc}		0.646	0.248	0.120	0.034	0.560	0.234	0.117	0.033
L_{w3}/L_{oc}		0.548	0.195	0.091	0.024	0.475	0.184	0.089	0.024
L_{w4}/L_{oc}		0.474	0.156	0.070	0.018	0.411	0.147	0.068	0.018
L_{w5}/L_{oc}		0.410	0.125	0.054	0.013	0.356	0.118	0.052	0.013
L_{w6}/L_{oc}		0.355	0.102	0.042	0.010	0.308	0.096	0.041	0.010
L_{w7}/L_{oc}	0.5	0.308	0.083	0.033	0.008	0.267	0.079	0.032	0.008
L_{w8}/L_{oc}		0.267	0.070	0.027	0.006	0.232	0.066	0.026	0.006
L_{w9}/L_{oc}		0.231	0.059	0.023	0.005	0.201	0.056	0.020	0.005
L_{w10}/L_{oc}		0.200	0.051	0.020	0.005	0.173	0.048	0.019	0.005
L_c/L_{oc}		1.438	1.158	1.075	1.020	1.235	1.093	1.045	1.012
L_f/L_{oc}		0.215	0.094	0.066	0.051	0.185	0.089	0.064	0.051
L_{w1}/L_{oc}		0.760	0.313	0.160	0.047	0.652	0.296	0.155	0.046
L_{w2}/L_{oc}		0.668	0.250	0.121	0.034	0.573	0.236	0.117	0.033
L_{w3}/L_{oc}		0.573	0.198	0.092	0.025	0.491	0.187	0.089	0.025
L_{w4}/L_{oc}		0.501	0.159	0.071	0.018	0.430	0.150	0.069	0.018
L_{w5}/L_{oc}	0.8	0.439	0.129	0.055	0.014	0.377	0.122	0.053	0.014
L_{w6}/L_{oc}		0.387	0.106	0.043	0.010	0.333	0.100	0.042	0.010
L_{w7}/L_{oc}		0.344	0.089	0.035	0.008	0.295	0.084	0.034	0.008
L_{w8}/L_{oc}		0.308	0.076	0.030	0.007	0.264	0.072	0.029	0.007
L_{w9}/L_{oc}		0.277	0.067	0.026	0.006	0.238	0.064	0.025	0.006
L_{w10}/L_{oc}		0.252	0.062	0.024	0.006	0.217	0.058	0.023	0.005

明らかにした。

また一般に L.A.C. は、作業面を考慮せず、天井面、壁面および床面だけについて、光束発散度比を求めるためのものであるが、これを用い床面上任意の高さの所における作業面上の照度、ならびに固有照明率を Cavity Method で求めた結果、Boast の値にきわめて近い値を得た。この計算結果や、その他各種灯器の効率算定、Shape Modulus の計算結果の誤差が最終光束発散度比に及ぼす影響、L.A.C. で照明計算をする場合に便利な組み合わせの原理、Cavity Method による作業面上の図式平均照度計算法などについては、いずれ改めて報告したいと思っている。

最後に自己面素による相互反射、その他いろいろご教示いただいた松下電器照明研究所の佐土根博士と森田、猪野原両氏、貴重な文献をお貸しいただき、またいろいろ

ろご指導くださった電気試験所大阪支所の納谷博士と山中氏、有効反射率に関する資料をいただいた京大建築学教室の松浦博士に心から深謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Ward Harrison and Earl A. Anderson : Illumination efficiencies as determined in an experimental room, Trans. I.E.S. 11 (1916) 67
- (2) H. Buckley : On the radiation from the inside of a circular cylinder, Phil. Mag. 4 (1927) 753, 6 (1928) 447, 17 (1934) 576
- (3) Z. Yamauti : Recherche d'un radiateur intégral au moyen d'un corps cylindrique, Com. Int. Poids et Mesures, Procès-verbaux 16 (1933) 243

第 3 表(a) Wiseman による積分方程式解による各面光束発散度比 円筒室 (矩形室), 光天井

光束 発散度比	k_r	1.0			1.5			2.0		
		ρ_e			ρ_e			ρ_e		
		ρ_w			ρ_w			ρ_w		
		ρ_f			ρ_f			ρ_f		
		0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1
L_c/L_{oc}		1.475	1.418	1.373	1.454	1.431	1.412	1.446	1.436	1.428
L_f/L_{oc}		0.315	0.169	0.051	0.200	0.109	0.033	0.217	0.070	0.021
E/L_{oc}		0.774	0.713	0.664	0.545	0.515	0.490	0.386	0.370	0.357
$L_w(T)/L_{oc}$	$S=0^*$	0.828	0.776	0.735	0.809	0.788	0.771	0.801	0.793	0.786
	1	0.760	0.708	0.666	0.709	0.688	0.670	0.671	0.662	0.655
	2	0.699	0.645	0.601	0.623	0.600	0.581	0.563	0.553	0.545
	3	0.644	0.587	0.542	0.547	0.523	0.502	0.472	0.461	0.452
	4	0.593	0.534	0.486	0.482	0.455	0.433	0.397	0.384	0.374
$L_w(M)/L_{oc}$	5	0.547	0.485	0.435	0.425	0.396	0.371	0.334	0.320	0.308
	6	0.506	0.440	0.387	0.376	0.343	0.316	0.282	0.266	0.252
	7	0.469	0.399	0.343	0.334	0.297	0.267	0.240	0.220	0.204
	8	0.435	0.361	0.301	0.297	0.256	0.223	0.204	0.181	0.162
	9	0.405	0.325	0.261	0.266	0.220	0.182	0.176	0.149	0.126
$L_w(B)/L_{oc}$	10	0.378	0.293	0.223	0.240	0.188	0.145	0.153	0.121	0.094

* s は天井面より床面へ $L_w(M)/L_{oc}$ は壁面中央 ($s=5$) での光束発散度比。第 3 表(b) Wiseman による積分方程式解による各面光束発散度比 円筒室 (矩形室), 光天井, $k_r=1.0$

光束 発散度比	ρ_e	0.8				0.7				0.5			
		ρ_w				ρ_w				ρ_w			
		ρ_f				ρ_f				ρ_f			
		0.8	0.5	0.3	0.1	0.8	0.5	0.3	0.1	0.8	0.5	0.3	0.1
L_c/L_{oc}		1.372	1.154	1.077	1.023	1.312	1.133	1.067	1.020	1.204	1.091	1.047	1.014
L_f/L_{oc}		0.051	0.028	0.020	0.015	0.049	0.027	0.020	0.015	0.045	0.026	0.020	0.015
E/L_{oc}		0.664	0.398	0.307	0.247	0.634	0.390	0.304	0.246	0.583	0.376	0.299	0.245
$L_w(T)/L_{oc}$	$S=0^*$	0.735	0.337	0.176	0.053	0.703	0.331	0.174	0.052	0.645	0.319	0.171	0.052
	1	0.666	0.292	0.149	0.044	0.636	0.287	0.147	0.043	0.584	0.276	0.145	0.043
	2	0.601	0.253	0.126	0.036	0.575	0.248	0.125	0.036	0.528	0.239	0.122	0.036
	3	0.542	0.219	0.107	0.030	0.518	0.215	0.106	0.030	0.475	0.207	0.104	0.030
$L_w(M)/L_{oc}$	4	0.486	0.190	0.090	0.025	0.465	0.186	0.089	0.025	0.427	0.179	0.088	0.025
	5	0.435	0.164	0.076	0.021	0.416	0.161	0.076	0.020	0.382	0.155	0.074	0.020
	6	0.387	0.141	0.065	0.017	0.370	0.139	0.064	0.017	0.340	0.134	0.063	0.017
	7	0.343	0.122	0.055	0.014	0.327	0.120	0.054	0.014	0.301	0.115	0.053	0.014
	8	0.301	0.105	0.046	0.012	0.287	0.103	0.046	0.012	0.264	0.099	0.045	0.012
	9	0.261	0.090	0.039	0.010	0.249	0.088	0.039	0.010	0.229	0.085	0.038	0.010
$L_w(B)/L_{oc}$	10	0.223	0.076	0.033	0.008	0.214	0.075	0.033	0.008	0.196	0.072	0.032	0.008
光束 発散度比	ρ_e	0.3				0.3				0.3			
		ρ_w				ρ_w				ρ_w			
		ρ_f				ρ_f				ρ_f			
		0.3	0.5	0.3	0.1	0.3	0.5	0.3	0.1	0.3	0.5	0.3	0.1
L_c/L_{oc}		1.418	1.167	1.084	1.027	1.348	1.143	1.072	1.023	1.226	1.098	1.051	1.017
L_f/L_{oc}		0.169	0.087	0.062	0.047	0.160	0.085	0.061	0.046	0.146	0.082	0.060	0.046
E/L_{oc}		0.713	0.408	0.311	0.248	0.678	0.400	0.308	0.247	0.616	0.384	0.302	0.246
$L_w(T)/L_{oc}$	$S=0^*$	0.776	0.344	0.178	0.053	0.738	0.337	0.176	0.053	0.671	0.324	0.173	0.052
	1	0.708	0.300	0.151	0.044	0.673	0.293	0.150	0.044	0.612	0.282	0.147	0.044
	2	0.645	0.261	0.128	0.037	0.613	0.256	0.127	0.036	0.557	0.246	0.125	0.036
	3	0.587	0.228	0.109	0.030	0.558	0.223	0.108	0.030	0.508	0.214	0.106	0.030
	4	0.534	0.199	0.093	0.025	0.507	0.195	0.092	0.025	0.462	0.187	0.090	0.025
$L_w(M)/L_{oc}$	5	0.485	0.174	0.080	0.021	0.461	0.170	0.079	0.021	0.419	0.164	0.077	0.021
	6	0.440	0.153	0.068	0.018	0.418	0.149	0.068	0.018	0.381	0.144	0.066	0.018
	7	0.399	0.134	0.059	0.015	0.379	0.131	0.059	0.015	0.345	0.126	0.057	0.015
	8	0.361	0.119	0.052	0.013	0.343	0.116	0.051	0.013	0.312	0.112	0.050	0.013
	9	0.325	0.105	0.045	0.011	0.309	0.103	0.045	0.011	0.281	0.099	0.044	0.011
$L_w(B)/L_{oc}$	10	0.293	0.094	0.040	0.010	0.278	0.092	0.040	0.010	0.253	0.089	0.039	0.010

* s は天井面より床面へ $L_w(M)/L_{oc}$ は壁面中央 ($s=5$) での光束発散度比。

- (4) K. Hisano : Light flux distribution in a rectangular parallelepiped and its simplifying scale, Researches Electrotech. Lab. Tokyo No. 394 (1936)
- (5) H.C. Hottell and F. Keller : Effect of radiation on heat transmission in furnaces and through openings, A.S.M.E. annual meeting (December, 1932)
- (6) Parry Moon : Interreflections in Finite Cylinder. J. O. S. A. 31 (1941) 223
- (7) D.C. Hamilton and W.R. Morgan : Radiant-Interchange Configuration Factors, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 2836
- (8) P.F. O'Brien : Interreflections in Rooms by a Network Method, J. O. S. A. 45 (1955) 419, Network Representation of the Integrating Sphere, J. O. S. A. 46 (1956) 343, Interreflections in Asymmetrical Rooms, Illum. Engng 53 (1958) 131, Lighting Calculations for 35,000 Rooms, Illum. Engng 55 (1960) 215
- (9) 納谷嘉信・山川邦雄・山中俊夫 : Philip F. O'Brien教授による照明用アナログ計算器(Luminous Analogue Computer) とその応用について 照学誌 45 (1961) 219
- (10) Z. Yamauti : The Light Flux Distribution of a System of Interreflecting Surfaces, J. O. S. A. 13 (1962) 561
- (11) 佐土根範次・森田政明・猪野原誠 : 住宅用照明器具による相互反射 照学誌 49 (1965) 4
- (12) Warren B. Boast : Illumination Engineering McGraw-Hill Book Co.
- (13) R.S. Wiseman : Brightness and Illumination by Interreflections in Enclosures, Illum. Engng 50 (1955) 227
- (14) Parry Moon : Interreflections in Lightwells J. O. S. A. 31 (1941) 301
- (15) 松浦邦男 : 作業面の等価反射率, 建築学会論文報告集 No. 54 (昭31) 509
猪野原誠・佐土根範次 : 屋内照明設計における作業面照度および壁面, 天井面の輝度計算法の改善 National Technical Report Vol. 11 (1965) 216
D.E. Spencer : The Effect of Furniture on the coefficient of utilization, Illum. Engng 52 (1957) 35
I.E.S. : Illumination Calculation Sheet, Illum. Engng 60 (1965) 279
P.F. O'Brien : Thermal and luminous radiative transfer (納谷博士のご厚意により拝借)

(受付 1966年3月8日 再受付 1966年7月22日)