The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	曇天空による室内照度に関する研究
Author(s)	比嘉, 俊太郎
Citation	大阪大学, 1980, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/724
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

曇天空による室内照度に関する研究

昭和55年9月

比　嘉　俊太郎

目　　次

1.　序　　論 …… 1
1.1　研究目的 …… 1
1.2　既往の研究との関連 …… 2
1.3　本論文の構成 …… 3
参考文献 …… 4

2.　曇天空による直接照度 …… 6
2.1　曇天空の輝度分布 …… 6
2.1.1　概　　説 …… 6
2.1.2　曇天空輝度分布の測定 …… 6
2.1.3　曇天空による全天空照度 …… 8
2.2　直接照度の基本式 …… 9
2.3　鉛直な台形光源による直接照度の計算式 …… 12
2.4　直接照度及び直接昼光率 …… 15
2.4.1　水平面照度 …… 15
2.4.2　鉛直面照度(1) …… 16
2.4.3　鉛直面照度(2) …… 17
2.5　第2章のまとめ …… 20
参考文献 …… 20

3.　長方形・直角三角形光源による直接昼光率 …… 22
3.1　特別な光源寸法に対する直接昼光率 …… 22
3.1.1　直角三角形光源(1) …… 22
3.1.2　直角三角形光源(2) …… 23
3.1.3　長方形光源 …… 24
3.2　水平な直角三角形光源による直接昼光率 …… 25
3.3　水平な長方形光源による直接昼光率 …… 27
3.4　直接昼光率計算式の極限値 …… 28
3.5　水平面直接昼光率の計算図表と計算例 …… 32
3.5.1　水平面直接昼光率の計算図表 …… 32
3.5.2　水平面直接昼光率の計算例 …… 42
3.6　鉛直面直接昼光率の計算図表と計算例 …… 51
3.6.1　鉛直面直接昼光率の計算図表 …… 51
3.6.2　鉛直面直接昼光率の計算例 …… 64
3.7　第3章のまとめ …… 75
参考文献 …… 75

4.　円形光源による直接昼光率 …… 77
4.1　概　説 …… 77
4.2　鉛直円形光源による直接昼光率 …… 78
4.3　鉛直半円形光源による直接昼光率 …… 94
4.4　水平円形光源による直接昼光率 …… 96
4.5　第4章のまとめ …… 105
参考文献 …… 105

5.　任意形態の光源による直接昼光率の図式解法 …… 106
5.1　均一輝度天空の場合 …… 106
5.1.1　立体角投射の法則 …… 106
5.1.2　ワルドラム図 …… 108
5.1.3　立体角投射図 …… 111
5.2　曇天空輝度分布の場合 …… 113
5.2.1　概　説 …… 113
5.2.2　ワルドラム図 …… 116
5.2.3　直接昼光率算定図 …… 123
5.3　第5章のまとめ …… 131
参考文献 …… 132

6.　曇天空の天頂輝度 …… 133
6.1　測定の目的 …… 133
6.2　測定資料とその検討 …… 133
6.3　年間の累積頻度分布曲線 …… 138
6.4　累積頻度分布曲線の応用例 …… 139
6.5　第6章のまとめ …… 141
参考文献 …… 141

7.　総　括 …… 143

謝　辞 …… 145

本論文に用いた主な記号

a：天球面の半径

b：光源の幅

c：定　　数

d：光源から受照点までの距離（室奥方向）

E_S：曇天時の全天空照度(lx)

$E(\theta)_H$：曇天時の水平面直接照度(lx)

$E(\theta)_{V1}$：曇天時の鉛直面直接照度(lx)

$E(\theta)_{V2}$：曇天時の鉛直面直接照度(lx)

F：平　　面

H：水平な受照面を表わす照度，昼光率の添字

h：太陽高度($deg.$)

k：定　　数

l：光源の高さ

L：均一輝度天空の輝度(cd/m^2)

L_θ：曇天時の天空要素の輝度(cd/m^2)

L_Z：天頂輝度(cd/m^2)

N：鉛直な長方形光源の中心から間口方向への距離

P：受 照 点

r：受照点から円形光源の中心までの距離

S：光　　源

U：立体角投射率（直接昼光率，%）

V_1：鉛直な受照面が光源面と平行な場合の照度，昼光率の添字

V_2：鉛直な受照面が光源面と垂直な場合の照度，昼光率の添字

U_H：均一輝度天空による水平面直接昼光率(%)

U_{V1}：均一輝度天空による鉛直面直接昼光率(%)

$U(\theta)_H$：曇天時の水平面直接昼光率(%)

$U(\theta)_{V1}$：曇天時の鉛直面直接昼光率(%)

$U(\theta)_{V2}$：曇天時の鉛直面直接昼光率(%)

$U_H(\square)$：鉛直な長方形光源による水平面直接昼光率(%)

$U_{V1}(\square)$：鉛直な長方形光源による鉛直面直接昼光率(%)

U_{V2}（▯）：鉛直な長方形光源による鉛直面直接昼光率(%)

U_H（◺）：鉛直な直角三角形光源による水平面直接昼光率(%)

U_{V1}（◺）：鉛直な直角三角形光源による鉛直面直接昼光率(%)

U_{V2}（◺）：鉛直な直角三角形光源による鉛直面直接昼光率(%)

U_H（▭）：水平な長方形光源による水平面直接昼光率(%)

U_{V1}（▭）：水平な長方形光源による鉛直面直接昼光率(%)

U_{V2}（▭）：水平な長方形光源による鉛直面直接昼光率(%)

U_H（◹）：水平な直角三角形光源による水平面直接昼光率(%)

U_{V1}（◹）：水平な直角三角形光源による鉛直面直接昼光率(%)

U_{V2}（◹）：水平な直角三角形光源による鉛直面直接昼光率(%)

U_{Vm}（▯）：鉛直な長方形光源による最大鉛直面直接昼光率(%)

α：円形光源の中心角(*deg.*)

γ：長方形光源の傾斜角(*deg.*)

θ：高　　度(*deg.*)

ρ：円形光源の半径

ϕ：方　　位(*deg.*)

ξ：定　　数

1. 序　論

1.1　研究目的

近年，世界的に人口の急速な増加に伴い，各国ともエネルギー危機に直面して，太陽エネルギーの有効利用に関する問題は人類が解決すべき重大な課題となっている。太陽エネルギーは熱エネルギー源，あるいは光エネルギー源として利用されるのが最も一般的であるが，その有効利用のためには，それぞれに関して正確な量的把握が必要である。採光及び照明設計に関しても，省エネルギーの観点から昼光の有効な利用方法について考究されるようになってきた。

従来の採光設計においては，光源となる天空の輝度分布はその実態がきわめて複雑なものであるが，実用上の観点から，均一な天空輝度分布が考えられ，直射日光を除いた全天空照度を基準とする昼光率を考え，それを指標とした計算が一般の設計計算に採用されている。[1] この採用の基礎となっている考えは下記のようである。

(1)昼間における明るさの変動を消去した昼光率は，天空光による明るさの程度を知るには有用な指標である。(2)採光によって室内照度を維持すべき一日中での時間のうち，最も不利なのは濃い曇天時であり，最低照度が確保できる。また，この場合の天空の輝度はほとんど均一に見える。(3)前記(2)を念頭において，採光設計を行う場合，天空は均一な輝度分布と仮定する方が思考上，計算上簡便である。

しかしながら，全天空照度が最低となるのは，厳密には前述のような濃い曇天時とは限らず，統計的には他の天空状態の場合も少なくはない。また，曇天空の場合の天空輝度分布は全天にわたって必ずしも均一ということはできない。

昼光の有効利用のためには，あらゆる天空状態を考慮して採光設計を行う必要があるが，ここでは，そのうち，曇天時を対象として昼光率を精密に計算し，検討を行って，それを測光量としての資料にして，採光設計に役立てることとした。

濃い曇天時の全天空上の輝度分布に関しては，Moon & Spencer[2] の研究があり，これに基づいて，国際照明委員会（CIE）[3] は標準の曇天空輝度分布として次式を採用している。

$$L_\theta = L_Z\,(1+2\sin\theta)/3 \quad \cdots\cdots (a)$$

L_θ：高度 θ 部分の天空輝度（cd／m^2）

L_Z：天頂輝度（cd／m^2），　θ：高度（deg.）

この天空輝度分布を考慮した昼光率を計算する場合，従来と大幅な変化をきたすのは直接昼光率の部分と考えられる。間接（拡散）昼光率も照明系への入力である直接昼光率の変化に伴う影響を当然受けるはずであるが，その計算方法は前者と別の系統をもっていると考えられるので，間接昼光率は切り離して取り扱うことができる。

以上のような背景から，曇天空の場合について，直接昼光率の計算の精度を高めるとともに，天空要素の輝度を実測を通じて明らかにすることによって，より有効な昼光の利用に役立てることが本研究の目的である。

1.2　既往の研究との関連

式（a）で表わされる輝度分布をもつ曇天空による直接照度の，この場合における全天空照度に対する百分率値である直接昼光率の計算法については，これまでわが国でも研究が行われており，それらの研究は天空の射影図などを利用した図式解析，及び基本式の数値積分によって作られた計算図表として成果を提示されたものである。それらのうち，大部分は前者に属する研究であり，後者では求めることができないような複雑な光源形態に応用できる点で，後者に勝った特徴を備えているが，迅速かつ正確に計算結果が得られる点では後者の方が勝っていると考えられる。

図式解法については，伊藤克三・手塚二郎・森肅[4)〜6)]は曇天空の輝度分布を実測して，わが国において，CIEの曇天空輝度分布の式 (a) が実状とよく一致することを確かめ，これを用いて，均一天空輝度の場合の立体角投射の法則と類似の方法により直接昼光率計算図表を発表している。これはこの図表上に受照点からの光源の輪郭を描き込み，その面積の全円面積に対する比率を求めて，直接昼光率を算定する方法である。小島武男[7)〜9)]は天球面上の輝度が式 (a) に従うものと仮定して，受照点が水平面上にある場合，及び½天空，¼天空に面する鉛直面上にある場合に関して直接昼光率計算図表を発表している。これは天球面を小区画に分割し，各区画による受照点の直接昼光率がすべて等しくなるようにして，これらの区画の射影図上に，同じ方法で光源となっている天空部分の射影図を描き，その中に含まれている区画数を数えることによって直接昼光率を求め

る方法である。関原猛夫・成瀬哲夫[10),11)]はCIEの曇天空用に修正されたワルドラム図を出発点として数値計算を行い，矩形開口部による水平面及び鉛直面に関する直接昼光率計算図表を作成し，その算定例について述べている。また，関原猛夫・柴田敬四郎[12)〜14)]は水平矩形開口部による鉛直面に関する同様の計算図表を発表している。両者は開口部を微小な面積に分割し，その微小面積からの直接昼光率を求め，これにガラスの透過特性を乗じて数値積分を行って，透明ガラス窓による直接昼光率計算図表も作成している。

Klaus Eberbach・Helmut Johanni[15)]は曇天空の場合の矩形開口部による直接昼光率を求めて，窓の前面に遮蔽物がある場合の計算例について記述している。これは窓の外部に天窓を遮蔽するものがある場合は，その遮蔽物の占める部分が天空であると仮定したときの，その部分による照度の15%を水平面照度に見込む方法である。

本研究では，CIEの曇天空輝度分布に従う場合について，直接照度を表わす基本式を求め，この基本式を鉛直な台形及び水平な直角三角形のような形態の光源に適用して，これらの光源による直接照度の計算式を誘導し，これを出発点として，若干の操作により種々の直線形態の光源による直接照度及び直接昼光率を求める式を誘導した。さらにそれら諸式を数値解析して直接昼光率に関する計算図表を作成した。また，円形光源に対しても若干の考察を加え，これに対する計算図表を作成した。任意形態の光源に対する直接昼光率は図式解法によって求めるため，その計算図表を作成した。

さらに，曇天空の場合の天空要素の輝度が天頂輝度に対する比として与えられていることを考慮して，先ず天頂輝度を実測して得た資料を統計的に処理して，天頂輝度を太陽高度の関数として表わした。次に，天頂輝度の年間の累積出現頻度分布を求め，これを直接照度に関する図表及び直接昼光率計算図表と組み合わせて，任意の二者から他方が求められる図表を作成した。

以上のように，本研究の特色は，従来断片的に行われていた曇天空に対する昼光率の解析を統一的に行い，高精度をもった有用な成果を提示するとともに，これを測光量として把握できる資料を与えることによって，昼光利用に役立つものとしたことである。

1.3　本論文の構成

第1章では研究の背景と目的について述べ，曇天空輝度分布による場合の直接昼光率に関して，既往の研究との関連について述べている。

第2章では曇天空の輝度分布について述べ，この場合の直接照度を表わす基本式を導き，この基本式により鉛直な台形光源による直接昼光率の計算式を求めた。

第3章では前章の台形光源による直接昼光率の計算式に若干の操作を加えて，鉛直な長方形光源及び直角三角形光源による直接昼光率の計算式を求めた。また，水平な直角三角形光源による直接昼光率の計算式より水平な長方形光源による同様の計算式を求めた。さらに，それらの光源による直接昼光率の計算図表を作成し，その使用例について述べている。

第4章では鉛直及び水平な円形光源による直接昼光率の計算式を求め，その計算図表を作成した。

第5章では任意の形態の光源による直接昼光率の図式解法について述べ，その計算図表を作成し，使用例を示している。

第6章では曇天空の場合の天頂輝度を実測して得た資料を統計的に処理して，天頂輝度を太陽高度の関数として表わし，これに基づいて，天頂輝度の年間の累積頻度分布曲線を求めた。これらを利用して，直接昼光率を測光量に換算し，照明設計に役立つ資料とした。

第7章では前章までで得られた結果について総括し，照明設計に対する今後の方針を述べている。

参考文献

1) 日本建築学会：採光設計(日本建築学会設計計画パンフレット16)，昭和38年9月

2) P. Moon, D. E. Spencer : Illumination from a Non-uniform Sky, Illuminating Engineering, Vol. 37, Dec. 1942

3) Proceeding 13th Session CIE, Vol. 2, 1955

4) 伊藤克三・手塚二郎：建築環境の輝度について，日本建築学会研究報告，第29号，昭和29年10月

5) 伊藤克三・手塚二郎：天空輝度分布を考慮した直接昼光率計算法，日本建築学会近畿支部研究報告，昭和35年2月

6) 伊藤克三・手塚二郎・森　　粛：天空輝度分布を考慮した直接昼光率計算法，日本建築学会論文報告集，第103号，昭和39年10月

7) 小島武男：水平面に対する立体角投射率の1計算図，日本建築学会論文報告集，第103号，昭和39年10月

8) 小島武男：鉛直面に対する立体角投射率の1計算図，日本建築学会論文報告集，号外，昭和40年9月

9) 小島武男：鉛直面に対する立体角投射率の1計算図(2)，日本建築学会東海支部研究報告集，第4号，昭和40年12月

10) 関原猛夫・成瀬哲夫：輝度分布が一様でない曇天空による直接昼光率の算定図表，日本建築学会論文報告集，第69号，昭和36年10月

11) 関原猛夫・成瀬哲夫：輝度分布が一様でない曇天空による直接昼光率の算定図表（続1. 対壁面の場合），日本建築学会論文報告集，第89号，昭和38年9月

12) 関原猛夫・柴田敬四郎：輝度分布が一様でない曇天空による直接昼光率の算定図表（続2. 側壁面の場合），日本建築学会論文報告集，第89号，昭和38年9月

13) 関原猛夫・柴田敬四郎：輝度分布が一様でない曇天空による直接昼光率の算定図表（続3. 水平矩形開口による側壁面の場合），日本建築学会論文報告集，第103号，昭和39年10月

14) 関原猛夫・柴田敬四郎：透明ガラス窓による直接昼光率の算定図表（II. CIEの基準曇天空の場合），日本建築学会論文報告集，号外，昭和40年9月

15) Klaus Eberbach, Helmut Johanni : Ein Verfahren zur Berechnung des Himmelslichtanteils und des Aussenreflexionsanteils des Tageslichtquotienten, Lichttechnik, Juni, 1969

2. 曇天空による直接照度

2.1 曇天空の輝度分布

2.1.1. 概　説

濃い雲が全天を覆い，太陽の位置が認められないような曇天空の輝度分布に関して，Moon & Spencer が多くの実測資料に基づいて下記の式を提案した。[1)]

$$\frac{L_\theta}{L_Z}=\frac{1+K\sin\theta}{1+K}$$

ここで，L_θは高度θの天空要素の輝度，L_Zは天頂輝度である。また，Kは定数で，地表面が雪で覆われた状態で1，普通の状態で2とされている。

国際照明委員会（CIE）は上記の式に基づいて，濃い曇天空の輝度分布を表わす式として，次式を採択している。[2)]

$$\frac{L_\theta}{L_Z}=\frac{1+2\sin\theta}{3} \quad \cdots\cdots (2.1)$$

式(2.1)においては，L_Zの絶対値は与えられていないから，相対的な輝度分布を定義するものである。この式によれば，曇天空の場合には，天空要素の輝度はその高度θのみに依存し，方位には無関係であることを示している。また，地平線近くの輝度は天頂輝度の1/3である。

2.1.2 曇天空輝度分布の測定

曇天空の輝度分布の実測は，大阪で伊藤克三・手塚二郎によって行われ，[3)] 東京と福井において，小木曽定彰・永田忠彦によって行われている。[4)] それぞれの測定結果は実状とよく一致することを示している。ここでは，名古屋における曇天空の輝度分布の実測について述べる。なお，この測定は各種の天空状態の輝度分布測定の一環として行われたものである。

〔1〕 測定の概要

測定は写真測光法によって，[5)] 名古屋工業大学土木建築棟屋上（北緯35°09′13.5″，東経136°55′37.4″）で行なった。測定器具は主撮影用にニコンFのボディーにOTスコープ[6)]を着装したもの，補助撮影用にフィッシュアイニッコール180°-OPを着装したも

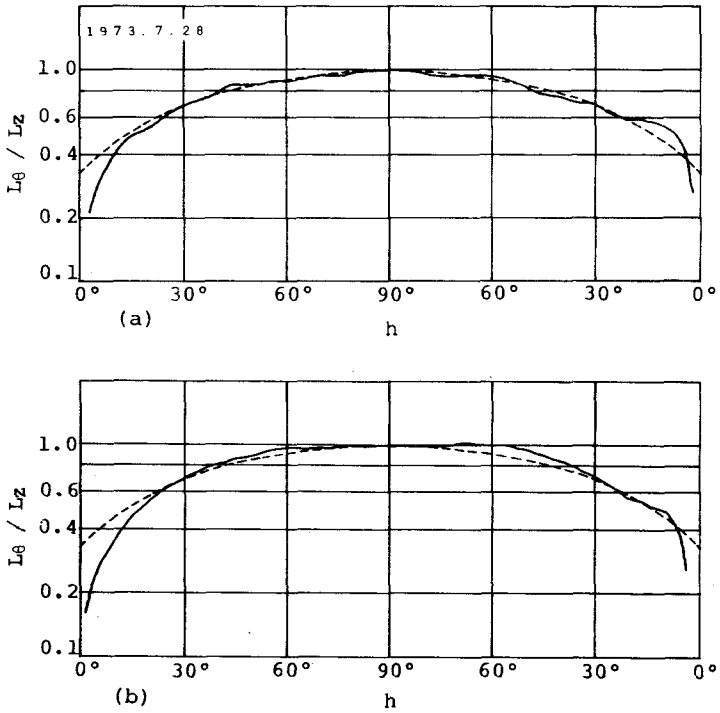
の，カラー撮影用カメラ（ニコンF）の3台のカメラで，それらを同時に使用して天空を撮影した。補助撮影はOTスコープに付属しているクロスリングによって反射光が生じるので，その部分を補正するために用い，カラー撮影は天空状態をより的確に把握するために用いた。

主撮影用及び補助撮影用にはフジフィルムNEOPAN F（ASA 32），カラー撮影用にはフジフィルムR 100（ASA 100）を使用した。また，適正露出時間と標準板の輝度測定は，ミノルタオートスポットメーター1°を用いて行った。OTスコープで撮影した全天空のフィルムの濃度測定はマイクロデンシトメーター（英国，ジョイス・レーベル社製）によって行い，その濃度を輝度に換算した。撮影した天空の輝度分布を描きやすくするために，カラーデータシステム（SHIBADEN・NAC）を利用した。

さらに，東芝照度計SPI-5型を用いて，直射法線面照度，昼光照度，全天空照度も合せて測定した。

〔2〕測定結果

OTスコープを用いて撮影した全天空のフィルムについて，太陽と天頂を含み，地平



図－2.1　曇天空輝度分布の測定例

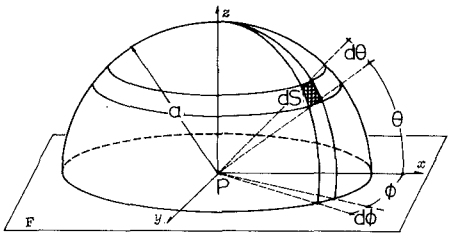
面に垂直な大円の方向とそれと直角をなす大円の方向に濃度計を走査させて濃度を測定し，その濃度を標準板の輝度に基づいて輝度に換算した。そして，それぞれの方向の天頂輝度を1として表示した。その測定の一例を図−2.1に示す。縦軸は天頂輝度に対する天空要素の輝度の比（L_θ / L_z），横軸は太陽高度（h）を表わす。同図（a）は太陽を含み地平面に垂直な大円の方向の分布を示し，（b）は（a）と直角をなす大円の方向の分布を示す。また，図中の点線は CIE 曇天空の輝度分布を示している。図より式（2.1）はかなりよく実状と合致していることが認められる。

2.1.3 曇天空による全天空照度

天空半球面上での L_θ の平均 Lm は

$$L_m = \int_S L_\theta \, dS \Big/ \int dS$$

であり，単位半球面について，この値 Lm を計算すると，次のようになる。



図−2.2

$$L_m = \frac{4}{3}\pi L_Z \Big/ 2\pi = \frac{2}{3} L_Z \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2)$$

採光計算では採光面による受照面上の点の直接照度よりも，直接昼光率が用いられることが多い。このファクターは全天空水平面照度に対する直接照度の百分率値である。従って，式（2.1）のような輝度分布に従う天空による全天空水平面照度と同一の全天空照度を与える均一輝度天空の輝度を，天空の平均輝度に類するものとみなした方が式（2.2）の値より比較の上で有用と考えられる。このような関係を見出すためには，式（2.1）の輝度分布をもつ天空による全天空水平面照度を求めておくことがまず必要である。

図−2.2において，任意半径 a の天空半球面を仮想し，その輝度分布が式（2.1）に従うものとして，中心点Pにおける水平面照度を求める。

ds による P 点の水平面照度 dE_S は

$$dE_S = \left[\left\{ a^2 \frac{L_Z}{3} (1 + 2\sin\theta)\cos\theta \right\} \Big/ a^2 \right] \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

$$= \frac{L_Z}{3} (1 + 2\sin\theta) \sin\theta \cos\theta \, d\theta \, d\phi$$

であり，全天空によるP点の水平面照度E_Sは次の式で与えられる。

$$E_S=\frac{L_Z}{3}\int_{-\pi}^{\pi}d\phi\int_0^{\pi/2}(1+2\sin\theta)\sin\theta\cos\theta\,d\theta=\frac{7}{9}\pi L_Z \quad\cdots\cdots(2.3)$$

式(2.3)と同一の全天空水平面照度を与える均一輝度天空の輝度をLとすると，$\pi L=(7/9)\pi L_Z$であるから

$$L=\frac{7}{9}L_Z$$

となる。これと等しいL_θは

$$L_\theta=\frac{7}{9}L_Z=\frac{1}{3}L_Z(1+2\sin\theta)$$

であるから，$\sin\theta=2/3$となり，これに対応する高度θは約41°49′である。すなわち，式(2.1)の輝度分布をもつ天空において，高度$\theta=41°49'$のLを測定して，この値をπ倍したものが，その時の全天空水平面照度に等しいということができる。従って，昼光率の実測を行なう場合，障害物のない屋上での全天空水平面照度の測定が不可能な際には，このような輝度を測定して，近似的に代用することも考えられる。また，天空の光源とする部分の高度が42°程度以上であれば，水平面照度は，等しい全天空水平面照度を与える均一輝度天空を仮定する場合よりも大きく，従って，直接昼光率もまた大となることが予想できる。

2.2 直接照度の基本式

図-2.3の点Pを中心として，半径aの半天球面を考え，この面上での輝度分布が式(2.1)に従うものと考える。図のx，y，z各座標軸はx，y面を受照水平面内にもち，点Pを原点とする適当な直交座標軸とし，θはx，y平面からz軸方向へ，ϕはx軸から時計まわりに測る角度とする。

いま，図-2.3に示すように，半天球面上に微小面積dSを考え，それが$\theta\sim\theta+d\theta$；$\phi\sim\phi+d\phi$の範囲にわたって存在するものとすると，$dS=a^2\cos\theta\,d\theta\,d\phi$であり，その

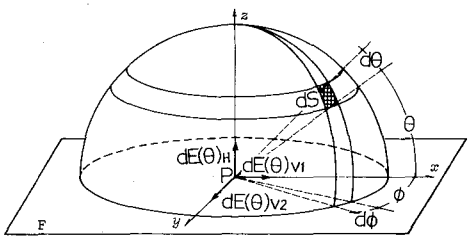


図-2.3

部分のP方向に対する光度は$L_\theta dS$であるから，図-2.3に示すようなP点の各照度はそれぞれ次のように表わされる。

$$dE(\theta)_H=(L_\theta a^2\cos\theta\, d\theta\, d\phi/a^2)\sin\theta=L_\theta\sin\theta\cos\theta\, d\theta\, d\phi \quad \cdots\cdots (2.4a)$$

$$dE(\theta)_{V_1}=(L_\theta a^2\cos\theta\, d\theta\, d\phi/a^2)\cos\theta\cos\phi=L_\theta\cos^2\theta\cos\phi\, d\theta\, d\phi \quad \cdots\cdots (2.4b)$$

$$dE(\theta)_{V_2}=(L_\theta a^2\cos\theta\, d\theta\, d\phi/a^2)\cos\theta\sin\phi=L_\theta\cos^2\theta\sin\phi\, d\theta\, d\phi \quad \cdots\cdots (2.4c)$$

$$L_\theta=L_Z(1+2\sin\theta)/3$$

従って，光源部分が$\theta_1\sim\theta_2$；$\phi_1\sim\phi_2$にわたっている場合のP点のz，x，y方向に向く照度$E(\theta)_H$，$E(\theta)_{V1}$，$E(\theta)_{V2}$はそれぞれ次のようである。

$$E(\theta)_H=\frac{L_Z}{3}\int_{\phi_1}^{\phi_2}d\phi\int_{\theta_1}^{\theta_2}(1+2\sin\theta)\sin\theta\cos\theta\, d\theta \quad \cdots\cdots (2.5a)$$

$$E(\theta)_{V_1}=\frac{L_Z}{3}\int_{\phi_1}^{\phi_2}\cos\phi\, d\phi\int_{\theta_1}^{\theta_2}(1+2\sin\theta)\cos^2\theta\, d\theta \quad \cdots\cdots (2.5b)$$

$$E(\theta)_{V_2}=\frac{L_Z}{3}\int_{\phi_1}^{\phi_2}\sin\phi\, d\phi\int_{\theta_1}^{\theta_2}(1+2\sin\theta)\cos^2\theta\, d\theta \quad \cdots\cdots (2.5c)$$

以上の積分の中で，式（2.5a）はすでに式（2.3）に至る過程において遂行したものである。

上記の各式の右辺のθに関する部分の積分遂行は，三角関数のベキ形を倍角形に変形することによって容易に行われる。その結果は次のようである。

$$E(\theta)_H=\frac{L_Z}{36}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[8\sin^3\theta+6\cos^2\theta-3]_{\theta_1}^{\theta_2}d\phi \quad \cdots\cdots (2.6a)$$

$$E(\theta)_{V_1}=\frac{L_Z}{36}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[-8\cos^3\theta+6\sin\theta\cos\theta+6\theta]_{\theta_1}^{\theta_2}\cos\phi\, d\phi \quad \cdots\cdots (2.6b)$$

$$E(\theta)_{V_2}=\frac{L_Z}{36}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[-8\cos^3\theta+6\sin\theta\cos\theta+6\theta]_{\theta_1}^{\theta_2}\sin\phi\, d\phi \quad \cdots\cdots (2.6c)$$

ここで，θがϕと独立であれば，式（2.6a）～（2.6c）は直ちに積分することができる。このような場合には，

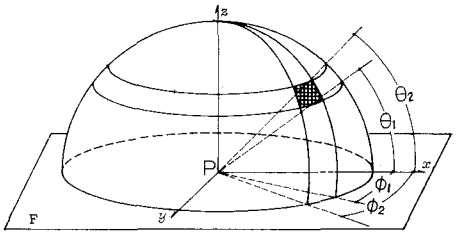
$$E(\theta)_H=[8(\sin^3\theta_2-\sin^3\theta_1)+6(\sin^2\theta_2-\sin^2\theta_1)](\phi_2-\phi_1) \quad \cdots\cdots (2.7a)$$

$$E(\theta)_{V1}=[-8(\cos^3\theta_2-\cos^3\theta_1)+6(\sin\theta_2\cos\theta_2-\sin\theta_1\cos\theta_1)$$
$$+6(\theta_2-\theta_1)](\cos\phi_2-\cos\phi_1) \quad \cdots\cdots (2.7\mathrm{b})$$

$$E(\theta)_{V2}=[-8(\cos^3\theta_2-\cos^3\theta_1)+6(\sin\theta_2\cos\theta_2-\sin\theta_1\cos\theta_1)$$
$$+6(\theta_2-\theta_1)](\sin\phi_2-\sin\phi_1) \quad \cdots\cdots (2.7\mathrm{c})$$

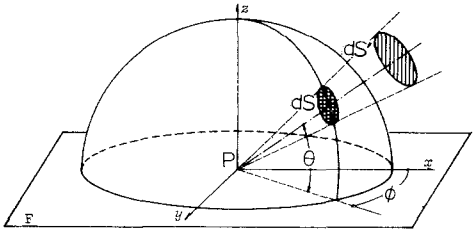
となる。これらはθがϕにかかわりのないときで，図－2.4の場合である。

一般に光源が水平または鉛直面上の図形である場合には，θはϕの関数となるので，式（2.7a）～（2.7c）はそのような場合には使用することができないが，第5章のような図計算に際して半天球面上の区画を考える場合の計算図の作成はここから出発することができる。



図－2.4

図－2.5において，dS′は実際の光源面上の微小面積要素であり，dSはdS′を底，Pを頂点とする錐面と半天球面の交線が与える半天球面上の微小面積要素であるとし，双方ともに式（2.1）の輝度分布をもつとすれば，dSによるP点のxy面に関する照度はdS′による同様の照度に等しい。すなわち，dS′とdSとが上述の対応をもつ微小面積である限り，式（2.1）が成立すれば，θの如何にかかわらず上述のことが成立する。このことはP点の受照面をyz平面，xz平面にとっても同様である。このことを



図－2.5

$$E(\theta,\mathrm{dS})=E(\theta,\mathrm{dS}')$$

と書くことにすれば，dS′を含む光源全体に対して同様のことがいえる。すなわち，光源を微小面積要素dS'_1, dS'_2, ……，これと図－2.5の対応を保つ半天球面上の微小面積要素をdS_1, dS_2, ……，とすると，次のように上記の関係を書き表わすことができる。

$$E(\theta, dS'_1) = E(\theta, dS_1)$$

$$E(\theta, dS'_2) = E(\theta, dS_2)$$

.....

$$E(\theta, dS'_n) = E(\theta, dS_n)$$

.....

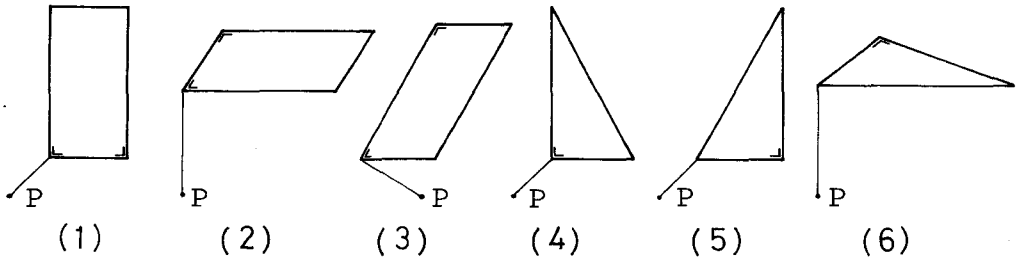
すなわち，

$$\sum_1^{\infty} E(\theta, dS'_n) = \sum_1^{\infty} E(\theta, dS_n)$$

以上のように，辺々相加の結果は光源によるP点の照度と半天球面によるP点の照度とが等しいことを示している。従って，基本式（2.6a）～（2.6c）の計算によって，簡単な形態をもつ平面光源に対して照度の計算式を求めることができる。

2.3　鉛直な台形光源による直接照度の計算式

普通の照度計算において，光源の形態は基本的なものとして，下図のようなものが多い。

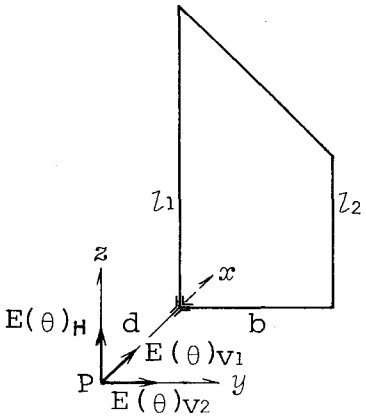


図－2.6

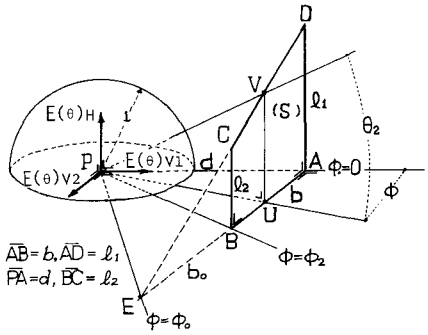
一般的な頻度からすれば(1)が最も多く，(2)，(3)がそれにつづき，(3)は(1)と(4)，(5)を採用することによって求め得ることが多い。(6)は水平な多角形光源の解を求める場合に利用することができる。

ここでは，まず図－2.7のような台形に関する照度式を基本式（2.6a）～（2.6c）によって求め，これを出発点とし，若干の操作によって，図－2.6うちの(1)，(4)，(5)に関する照度式を誘導することにする。

図－2.8において，$b + b_0 = \overline{AE}$, $\overline{BE} = b_0$, $\theta_1 = 0$，　$\angle APE = \phi_0$，　$\angle APB = \phi_2$ とする。



図－2.7



図－2.8

ここで与えられている寸法は b，l_1，l_2，d であって，b_0 はこれらの値から

$$b_0 = b \cdot l_2 / (l_1 - l_2)$$

と表わすことができる。また，式（2.6a）～（2.6c）において，$\theta_1 = 0$，$\theta_2 = \angle \mathrm{VPU}$ とすると，

$$\tan\theta_2 = \frac{\overline{\mathrm{UV}}}{\overline{\mathrm{PU}}} \quad ,$$

であるから，

$$\tan\theta_2 = l_1(b + b_0 - d\tan\phi)/(b + b_0)d\sec\phi$$

$$= \frac{l_1 - l_2}{b}\left\{\frac{b + b_0}{d} - \tan\phi\right\}\cdot\cos\phi$$

さらに，$\tan\theta_2$ は $\angle \mathrm{APE} = \phi_0$ とおき，

$$\tan\phi_0 = \frac{\overline{\mathrm{AE}}}{d} = \frac{b + b_0}{d}$$

とすると，

$$\tan\theta_2 = \frac{l_1 - l_2}{b} \cdot \sec\phi_0 \cdot \sin(\phi_0 - \phi)$$

ここで，$(l_1 - l_2)\sec\phi_0 / b$ は定数であるから，これを c とおけば

$$\tan\theta_2 = c \cdot \sin(\phi_0 - \phi) \quad , \quad c = (l_1 - l_2)\sec\phi_0 / b$$

従って，式（2.6a）～（2.6c）の積分を行うには，

$$\theta_1 = 0$$

$$\tan\theta_2 = c\sin(\phi_0 - \phi) \quad , \quad c = (l_1 - l_2)\sec\phi_0 / b$$

とすればよい。以上によって，被積分関数はϕの関数となり，図-2.8を参照して，$\phi = 0 \sim \phi_0$を積分範囲とすればよい。また，cは下記のようになる。

$$c = (l_1 - l_2)\sec\phi_0 / b = \sqrt{b^2 l_1^2 + d^2(l_1 - l_2)^2} / bd \quad \cdots\cdots \text{(a)}$$

θ_1，θ_2を式（2.6a）～（2.6c）に代入するために，θ_2を次のように表わす。

$$\left.\begin{aligned} \cos\theta_2 &= 1 / \left\{1 + c^2\sin^2(\phi_0 - \phi)\right\}^{1/2} \\ \sin\theta_2 &= c\sin(\phi_0 - \phi) / \left\{1 + c^2\sin^2(\phi_0 - \phi)\right\}^{1/2} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots \text{(b)}$$

$$\left.\begin{aligned} &\theta_1 = 0 \\ &\phi_1 = 0 \ , \quad \phi_2 = \tan^{-1}(b/d) \end{aligned}\right\} \cdots\cdots \text{(c)}$$

上記の式(b),(c)を式（2.6a）～（2.6c）に代入して，積分可能な形にすると，下記のようになる。

$$E(\theta)_H = \frac{L_Z}{36}\int_0^{\tan^{-1}b/d}\left[8\left\{\frac{c\sin(\phi_0-\phi)}{\sqrt{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}}\right\}^3 - 6\frac{1}{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)} + 6\right]d\phi \quad \cdots\cdots (2.8a)$$

$$E(\theta)_{V_1} = \frac{L_Z}{36}\int_0^{\tan^{-1}b/d}\left[-8\left\{\frac{1}{\sqrt{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}}\right\}^3 + 6\frac{c\sin(\phi_0-\phi)}{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}\right.$$

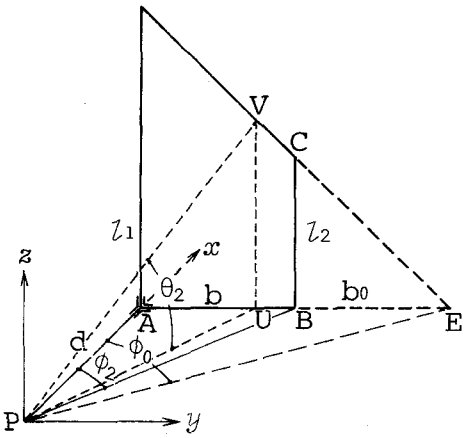
$$\left. + 6\tan^{-1}\{c\sin(\phi_0-\phi)\} + 8\right]\cos\phi\, d\phi \quad \cdots\cdots (2.8b)$$

$$E(\theta)_{V_2} = \frac{L_Z}{36}\int_0^{\tan^{-1}b/d}\left[-8\left\{\frac{1}{\sqrt{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}}\right\}^3 + 6\frac{c\sin(\phi_0-\phi)}{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}\right.$$

$$\left. + 6\tan^{-1}\{c\sin(\phi_0-\phi)\} + 8\right]\sin\phi\, d\phi \quad \cdots\cdots (2.8c)$$

2.4　直接照度及び直接昼光率

前節で導いた直接照度$E(\theta)$の積分式（2.8a）～（2.8c）の計算は，被積分関数に若干の置換または部分分数化を行うか，あるいは部分積分法を適宜に応用して遂行することができる。ここでは，図－2.9を参照してその計算過程を示すことにする。



図－2.9

2.4.1　水平面照度

$$E(\theta)_H=\frac{L_Z}{36}\int_0^{\tan^{-1}b/d}\left[8\left\{\frac{c\sin(\phi_0-\phi)}{\sqrt{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}}\right\}^3+6\frac{c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}\right]d\phi$$

この式を下記のようにおく。

$$E(\theta)_H=\frac{L_Z}{36}\left\{8\left[I(\theta)_1\right]_0^{\phi_2}+6\left[I(\theta)_2\right]_0^{\phi_2}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2.9)$$

ただし，$\phi_2=\tan^{-1}(b/d)$

定積分$\left[I(\theta)_1\right]_0^{\phi_2}$，$\left[I(\theta)_2\right]_0^{\phi_2}$は次のようである。

$$\left[I(\theta)_1\right]_0^{\phi_2}=\frac{bd^3(l_1-l_2)\sqrt{N^2-b^2d^2}}{N^2\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}-\frac{bd\sqrt{N^2-b^2d^2}\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}{N^2\sqrt{l_2^2N^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}$$

$$+\tan^{-1}\frac{b\sqrt{N^2l_1^2+d^4(l_1-l_2)^2}}{d(l_1-l_2)\sqrt{N^2-b^2d^2}}-\tan^{-1}\frac{db\sqrt{N^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(a)$$

$$\left[I(\theta)_2\right]_0^{\phi_2}=\frac{db}{N}\left\{\tan^{-1}\frac{l_2N}{\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}-\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}\right\}$$

$$+\tan^{-1}\frac{bl_1}{d(l_1-l_2)}-\tan^{-1}\frac{dbl_2}{\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(b)$$

以上に求めた式(a)，(b)を式（2.9）に代入して，水平面直接照度$E(\theta)_H$は次のように表わされる。

$$E(\theta)_H=\frac{L_Z}{36}\left[8\left\{\frac{bd^3(l_1-l_2)\sqrt{N^2-b^2d^2}}{N^2\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}-\frac{bd\sqrt{N^2-b^2d^2}\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}{N^2\sqrt{l_2^2N^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\right\}\right.$$

$$+8\left\{\tan^{-1}\frac{b\sqrt{N^2l_1^2+d^4(l_1-l_2)^2}}{d(l_1-l_2)\sqrt{N^2-b^2d^2}}-\tan^{-1}\frac{db\sqrt{N^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}\right\}$$

$$+6\frac{db}{N}\left\{\tan^{-1}\frac{l_2N}{\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}-\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}\right\}$$

$$\left.+6\tan^{-1}\frac{bl_1}{d(l_1-l_2)}-6\tan^{-1}\frac{dbl_2}{\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}\right] \quad \cdots\cdots (2.10)$$

ただし，$N^2=b^2d^2+b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2$ で，b，d，l_1，l_2 は図－2.9に示すとおりである。

2.4.2 鉛直面照度(1)

$$E(\theta)_{V1}=\frac{L_Z}{36}\int_0^{\phi_2}\left[-8\left\{\frac{1}{\sqrt{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}}\right\}^3+6\frac{c\sin(\phi_0-\phi)}{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}\right.$$

$$\left.+6\cdot\tan^{-1}\{c\sin(\phi_0-\phi)\}+8\right]\cos\phi d\phi$$

ただし，$\phi_2=\tan^{-1}(b/d)$

これを下記のように書くことにすると，

$$E(\theta)_{V1}=\frac{L_Z}{36}\left\{-8[I(\theta)_1]_0^{\phi_2}+6[I(\theta)_2]_0^{\phi_2}+6[I(\theta)_3]_0^{\phi_2}+8[I(\theta)_4]_0^{\phi_2}\right\} \quad \cdots\cdots (2.11)$$

定積分 $\left[I(\theta)_1\right]_0^{\phi_2}\sim\left[I(\theta)_4\right]_0^{\phi_2}$ は次のようである。

$\phi=0$，$\phi=\phi_2$ に対する $t=\tan(\phi_0-\phi)$ の値をそれぞれ t_0，t_2 とすれば，

$$t_0=\frac{bl_1}{d(l_1-l_2)},\quad t_2=\frac{bdl_2}{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1} \quad \cdots\cdots (a)$$

$$[I(\theta)_1]_0^{\phi_2}=-\frac{\sqrt{\xi}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left[\frac{d(l_1-l_2)t-bl_1\xi}{\sqrt{t^2+\xi}}\right]_{t_0}^{t_2},\qquad \xi=\frac{1}{1+c^2} \quad \cdots\cdots (b)$$

$$[I(\theta)_2]_0^{\phi_2}=\frac{-c\xi}{(1-\xi)\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left[\frac{d(l_1-l_2)}{2}\log\frac{t^2+\xi}{t^2+1}-\sqrt{\xi}\,bl_1\tan^{-1}\frac{t}{\sqrt{\xi}}+bl_1\tan^{-1}t\right]_{t_0}^{t_2} \quad \cdots\cdots (c)$$

$$[I(\theta)_3]_0^{\phi_2}=\frac{1}{\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left[\frac{bl_1-d(l_1-l_2)t}{\sqrt{t^2+1}}\tan^{-1}\frac{ct}{\sqrt{t^2+1}}\right.$$

$$\left.-\frac{c\xi}{1-\xi}\left\{\frac{d(l_1-l_2)}{2}\log\frac{t^2+1}{t^2+\xi}+\frac{bl_1}{\sqrt{\xi}}\tan^{-1}\frac{t}{\sqrt{\xi}}-bl_1\tan^{-1}t\right\}\right]_{t_0}^{t_2} \quad \cdots\cdots (d)$$

$$[I(\theta)_4]_0^{\phi_2}=\sin\phi_2=\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}} \quad \cdots\cdots (e)$$

以上に求めた式(a)～(e)を式（2.11）に代入し，図－2.9を参照して，各部寸法を考慮して整理すると，鉛直面直接照度$E(\theta)_{V1}$は次のようになる。

$$E(\theta)_{V1}=\frac{L_Z}{36}\left[8\frac{bd}{N\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left\{\frac{d\,[l_2N^2(l_1-l_2)-b^2l_1\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}]}{N\sqrt{N^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}+\frac{N\sqrt{N^2-b^2d^2}}{d\sqrt{b^2+d^2}}\right.\right.$$

$$\left.-\frac{dl_1(l_1-l_2)(N^2-b^2d^2)}{N\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}\right\}+6\left\{\frac{bl_1}{N}\left(\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}-\tan^{-1}\frac{l_2N}{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1}\right)\right.$$

$$\left.\left.+\frac{b\{b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2\}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\tan^{-1}\frac{l_2\sqrt{N^2-b^2d^2}}{\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\right\}\right] \quad (2.12)$$

ただし，$N^2=b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2+d^2b^2$

2.4.3. 鉛直面照度(2)

$$E(\theta)_{V2}=\frac{L_Z}{36}\int_0^{\phi_2}\left[-8\left\{\frac{1}{\sqrt{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}}\right\}^3+6\frac{c\sin(\phi_0-\phi)}{1+c^2\sin^2(\phi_0-\phi)}\right.$$

$$\left.+6\cdot\tan^{-1}\{c\sin(\phi_0-\phi)\}+8\right]\sin\phi d\phi$$

ただし，$\phi_2=\tan^{-1}(b/d)$

これを次のように書くことにする。

$$E(\theta)_{V2}=\frac{L_Z}{36}\left\{-8[I(\theta)_1]_0^{\phi_2}+6[I(\theta)_2]_0^{\phi_2}+6[I(\theta)_3]_0^{\phi_2}+8[I(\theta)_4]_0^{\phi_2}\right\} \quad \cdots\cdots (2.13)$$

定積分 $\left[I(\theta)_1\right]_0^{\phi_2}$ ～ $\left[I(\theta)_4\right]_0^{\phi_2}$ は下記のようになる。また，t_0，t_2 はそれぞれ$\phi=0$，$\phi=\phi_2$に対する $t=\tan(\phi_0-\phi)$の値であるから，鉛直面照度 (1) の場合と同様の値となる。

$$[I(\theta)_1]_0^{\phi_2}=\frac{-\sqrt{\xi}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left[\frac{d(l_1-l_2)\xi+bl_1t}{\sqrt{t^2+\xi}}\right]_{t_0}^{t_2},\qquad \xi=\frac{1}{1+c^2} \quad \cdots\cdots (a)$$

$$[I(\theta)_2]_0^{\phi_2}=\frac{-c\xi}{(1-\xi)\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left[\frac{bl_1}{2}\log\frac{t^2+\xi}{t^2+1}+d(l_1-l_2)\sqrt{\xi}\tan^{-1}\frac{t}{\sqrt{\xi}}-d(l_1-l_2)\tan^{-1}t\right]_{t_0}^{t_2} \quad (b)$$

$$[I(\theta)_3]_0^{\phi_2}=\frac{-1}{\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left[\frac{bl_1t+d(l_1-l_2)}{\sqrt{t^2+1}}\tan^{-1}\frac{ct}{\sqrt{t^2+1}}\right.$$

$$\left.-\frac{c\xi}{1-\xi}\left\{\frac{bl_1}{2}\log\frac{t^2+\xi}{t^2+1}+\frac{d(l_1-l_2)}{\sqrt{\xi}}\tan^{-1}\frac{t}{\sqrt{\xi}}-d(l_1-l_2)\tan^{-1}t\right\}\right]_{t_0}^{t_2} \quad (c)$$

$$[I(\theta)_4]_0^{\phi_2}=1-\frac{d}{\sqrt{b^2+d^2}} \quad \cdots\cdots (d)$$

以上に求めた式(a)～(d)を式（2.13）に代入し，図－2.9を参照して，各部寸法を代入し整理すると，鉛直面直接照度$E(\theta)_{V2}$は次のようになる。

$$E(\theta)_{V2}=\frac{L_Z}{36}\left[8\left\{\frac{b^2d[d^2(l_1-l_2)\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}+l_1l_2N^2]}{N^2\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{l_2^2N^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}-\frac{b^2d\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}{N^2\sqrt{N^2-b^2d^2}}\right.\right.$$

$$\left.+\frac{\sqrt{b^2+d^2}-d}{\sqrt{b^2+d^2}}\right\}+6\frac{d(l_1-l_2)}{N}\left\{\tan^{-1}\frac{l_2N}{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1}-\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}\right\}$$

$$-6\frac{d[(l_1-l_2)\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}+b^2l_1l_2]}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\tan^{-1}\frac{l_2\sqrt{N^2-b^2d^2}}{\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}$$

$$\left.+6\frac{\sqrt{d^2(l_1-l_2)^2+b^2l_1^2}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}}\tan^{-1}\frac{l_1\sqrt{N^2-b^2d^2}}{d\sqrt{b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2}}\right] \quad \cdots\cdots \quad (2.14)$$

ただし，$N^2=b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2+d^2b^2$

式（2.10）（2.12）（2.14）は図－2.9に示すような台形光源ＡＢＣＤによるＰ点の直接照度を与える式である。これらを一括して示す。

$$E(\theta)_H=\frac{L_Z}{36}\left[8\left\{\frac{bd^3(l_1-l_2)\sqrt{N^2-b^2d^2}}{N^2\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}-\frac{bd\sqrt{N^2-b^2d^2}\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}{N^2\sqrt{l_2^2N^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\right\}\right.$$

$$+8\left\{\tan^{-1}\frac{b\sqrt{N^2l_1^2+d^4(l_1-l_2)^2}}{d(l_1-l_2)\sqrt{N^2-b^2d^2}}-\tan^{-1}\frac{db\sqrt{N^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}\right\}$$

$$+6\frac{db}{N}\left\{\tan^{-1}\frac{l_2N}{\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}-\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}\right\}$$

$$\left.+6\tan^{-1}\frac{bl_1}{d(l_1-l_2)}-6\tan^{-1}\frac{dbl_2}{\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}\right] \quad \cdots\cdots \quad (2.10)$$

$$E(\theta)_{V1}=\frac{L_Z}{36}\left[8\frac{bd}{N\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left\{\frac{d[l_2N^2(l_1-l_2)-b^2l_1\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}]}{N\sqrt{N^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}+\frac{N\sqrt{N^2-b^2d^2}}{d\sqrt{b^2+d^2}}\right.\right.$$

$$\left.-\frac{dl_1(l_1-l_2)(N^2-b^2d^2)}{N\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}\right\}+6\left\{\frac{bl_1}{N}\left(\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}-\tan^{-1}\frac{l_2N}{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1}\right)\right.$$

$$\left.\left.+\frac{b\{b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2\}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\tan^{-1}\frac{l_2\sqrt{N^2-b^2d^2}}{\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\right\}\right] \quad (2.12)$$

$$E(\theta)_{V2}=\frac{L_Z}{36}\left[8\left\{\frac{b^2d[d^2(l_1-l_2)\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}+l_1l_2N^2]}{N^2\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{l_2^2N^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}-\frac{b^2d\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}{N^2\sqrt{N^2-b^2d^2}}\right.\right.$$

$$\left.+\frac{\sqrt{b^2+d^2}-d}{\sqrt{b^2+d^2}}\right\}+6\frac{d(l_1-l_2)}{N}\left\{\tan^{-1}\frac{l_2N}{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1}-\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}\right\}$$

$$-6\frac{d[(l_1-l_2)\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}+b^2l_1l_2]}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\tan^{-1}\frac{l_2\sqrt{N^2-b^2d^2}}{\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}$$

$$\left.+6\frac{\sqrt{d^2(l_1-l_2)^2+b^2l_1^2}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}}\tan^{-1}\frac{l_1\sqrt{N^2-b^2d^2}}{d\sqrt{b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2}}\right] \quad \cdots\cdots \quad (2.14)$$

ただし，$N^2=b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2+d^2b^2$

これらの直接照度の式に 100／Es（Es は式（2.3）に示す曇天空による全天空水平面照度）を乗じたものは，均一輝度をもつ天空を仮定した場合の照明計算に際して考えられている立体角投射率と同様の意味をもつものである。ここでは，それらを直接昼光率と呼ぶこととし，それぞれ$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$ と記すことにすれば，次のようである。

$$U(\theta)_H=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bd^3(l_1-l_2)\sqrt{N^2-b^2d^2}}{N^2\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}-\frac{bd\sqrt{N^2-b^2d^2}\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}{N^2\sqrt{l_2^2N^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\right\}\right.$$

$$+8\left\{\tan^{-1}\frac{b\sqrt{N^2l_1^2+d^4(l_1-l_2)^2}}{d(l_1-l_2)\sqrt{N^2-b^2d^2}}-\tan^{-1}\frac{db\sqrt{N^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}\right\}$$

$$+6\frac{db}{N}\left\{\tan^{-1}\frac{l_2N}{\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}-\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}\right\}$$

$$\left.+6\tan^{-1}\frac{bl_1}{d(l_1-l_2)}-6\tan^{-1}\frac{dbl_2}{\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}}\right] \ \% \quad \cdots\cdots \quad (2.15)$$

$$U(\theta)_{V1}=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{bd}{N\sqrt{N^2-b^2d^2}}\left\{\frac{d[l_2N^2(l_1-l_2)-b^2l_1\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}]}{N\sqrt{N^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}+\frac{N\sqrt{N^2-b^2d^2}}{d\sqrt{b^2+d^2}}\right.\right.$$

$$\left.-\frac{dl_1(l_1-l_2)(N^2-b^2d^2)}{N\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}\right\}+6\left\{\frac{bl_1}{N}\left(\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}-\tan^{-1}\frac{l_2N}{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1}\right)\right.$$

$$\left.\left.+\frac{b\{b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2\}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\tan^{-1}\frac{l_2\sqrt{N^2-b^2d^2}}{\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\right\}\right]\% \quad (2.16)$$

$$U(\theta)_{V2}=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{b^2d[d^2(l_1-l_2)\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}+l_1l_2N^2]}{N^2\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{l_2^2N^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}-\frac{b^2d\sqrt{l_1^2N^2+d^4(l_1-l_2)^2}}{N^2\sqrt{N^2-b^2d^2}}\right.\right.$$

$$\left.+\frac{\sqrt{b^2+d^2}-d}{\sqrt{b^2+d^2}}\right\}+6\frac{d(l_1-l_2)}{N}\left\{\tan^{-1}\frac{l_2N}{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1}-\tan^{-1}\frac{l_1N}{d^2(l_1-l_2)}\right\}$$

$$-6\frac{d[(l_1-l_2)\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}+b^2l_1l_2]}{\sqrt{N^2-b^2d^2}\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}\tan^{-1}\frac{l_2\sqrt{N^2-b^2d^2}}{\sqrt{b^2d^2l_2^2+\{d^2(l_1-l_2)+b^2l_1\}^2}}$$

$$\left.+6\frac{\sqrt{d^2(l_1-l_2)^2+b^2l_1^2}}{\sqrt{N^2-b^2d^2}}\tan^{-1}\frac{l_1\sqrt{N^2-b^2d^2}}{d\sqrt{b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2}}\right]\% \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.17)$$

ただし，$N^2=b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2+d^2b^2$

2.5　第2章のまとめ

この章では，完全な曇天空の輝度分布を測定して，式（2.1）がわが国においても実状とよく一致することを確かめ，これに基づいて，直接照度の基本式を求めた。また，均一輝度天空の場合の立体角投射の法則と同様の考え方に従い，全天空水平面照度に対する直接照度の比を百分率値で表わして，これを直接昼光率とよぶこととした。さらに，この直接照度の基本式を鉛直な台形光源に適用して，この台形光源による水平面および鉛直面に関する直接照度，直接昼光率を求める式を誘導した。

参考文献

1)　P. Moon, D. E. Spencer : Illumination from a Non-uniform Sky, Illuminating Engineering, Vol. 37, Dec. 1942

2)　Proceeding 13th Session CIE, Vol. 2, 1955

3)　伊藤克三・手塚二郎：建築環境の輝度について，日本建築学会研究報告，第29号，昭和29年10月

4)　小木曽定彰・永田忠彦：冬季曇天時に於ける天空輝度分布の測定（天空輝度分布に関する研究Ⅱ），日本建築学会論文報告集，第69号，昭和36年10月

5)　中村洋・沖允人・比嘉俊太郎：中間天空状態における天空輝度分布に関する研究(Ⅱ) ――天頂輝度について――，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和49年10月

6)　中村洋：写真測光法による輝度測定の試み，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和46年11月

7) 中村洋・沖允人：写真測光法による輝度測定の試み (II)，（天空輝度分布の測定——較正，周辺光量），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和47年10月

8) 中村洋・沖允人：写真測光法による輝度測定の試み (III)，（天空輝度分布の測定——実測例），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和47年10月

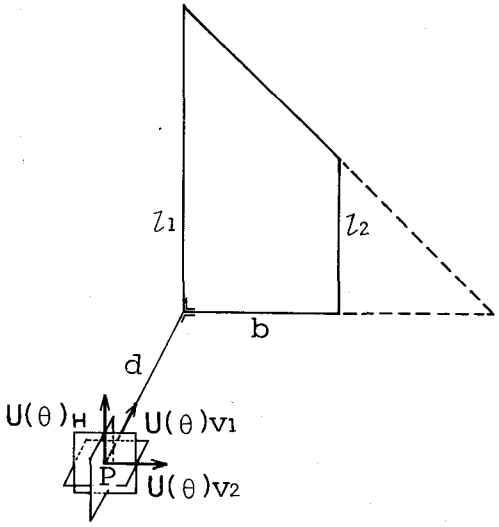
9) 小木曽定彰・武井正昭：正射影型魚眼撮影装置「ＯＴスコープ」の考案，第１部——ＯＴスコープの機構とその応用，日本建築学会論文報告集，第119号，昭和41年１月

10) 武井正昭：正射影型魚眼撮影装置「ＯＴスコープ」の考案，第２部——光学系の解，特解および精度，日本建築学会論文報告集，第122号，昭和41年４月

11) 小島武男・比嘉俊太郎・鵜飼正保・西安男 ： ＣＩＥ標準曇天光による直接照度の計算式，日本建築学会論文報告集，第141号，昭和42年11月

3. 長方形・直角三角形光源による直接昼光率

前章で図−3.1のような輪郭をもち，その輝度分布が受照点からみるときの高度θに従って，$L_\theta = L_Z(1+2\sin\theta)/3$ で与えられる光源による受照点の直接昼光率$U(\theta)_H$, $U(\theta)_{V1}$, $U(\theta)_{V2}$の式(2.15)〜(2.17)を導いた。ここでは式(2.15)〜(2.17)に基づいて，より一般的な直線形の光源に対する計算式について考える。



図−3.1　台形光源

3.1　特別な光源寸法に対する直接昼光率[1)〜3)]

図−3.1の光源各部の寸法l_1，l_2，bに特別な値，例えば，$l_1=0$, $l_2=l$；$l_1=l$, $l_2=0$；$l_1=l_2=l$などを与えると鉛直な直角三角形，長方形の光源に対する直接昼光率の計算式が得られる。それらは次のようである。

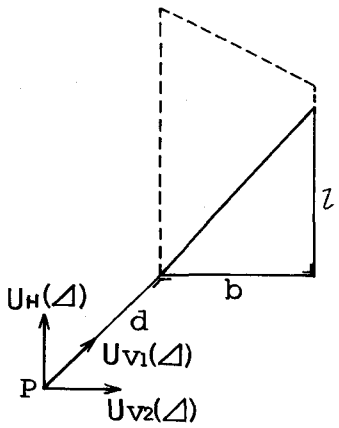
3.1.1　直角三角形光源(1)

$l_1=0$，$l_2=l$ の場合，光源は図−3.2のようであり，

$l_1=0$，$l_2=l$ に対し，

$$N^2=b^2d^2+b^2l_1^2+d^2(l_1-l_2)^2=d^2(b^2+l^2)$$

であるから，式(2.15)〜(2.17)を整理する。また，$U(\theta)_H$, $U(\theta)_{V1}$, $U(\theta)_{V2}$を図中に示すように，それぞれ$U_H(\triangle)$, $U_{V1}(\triangle)$, $U_{V2}(\triangle)$と書き改め，上記の値を式(2.15)〜(2.17)に代入して，図−3.2のような直角三角形光源による直接昼光率を求めると次のようになる。



図−3.2　直角三角形光源

$$U_H(\text{⊿})=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bl(d-\sqrt{b^2+d^2+l^2})}{(b^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}+\tan^{-1}\frac{bl(\sqrt{b^2+d^2+l^2}-d)}{l^2d+b^2\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right\}\right.$$

$$\left.-6\left\{\frac{b}{\sqrt{b^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{\sqrt{b^2+l^2}}{d}-\tan^{-1}\frac{b}{d}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots\cdots (3.1\text{a})$$

$$U_{V_1}(\text{⊿})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b(\sqrt{b^2+d^2+l^2}-\sqrt{b^2+d^2})}{\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}+6\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}\right]\% \quad \cdots\cdots\cdots (3.1\text{b})$$

$$U_{V_2}(\text{⊿})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l^2\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}+b^2d\sqrt{b^2+d^2}-d(b^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}{(b^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

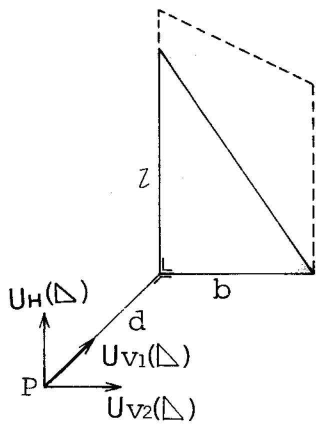
$$\left.-6\left\{\frac{d}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}-\frac{l}{\sqrt{b^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{\sqrt{b^2+l^2}}{d}\right\}\right]\% \cdots\cdots\cdots (3.1\text{c})$$

3.1.2　直角三角形光源(2)

$l_1=l$，$l_2=0$ の場合は，光源は図－3.3のようであり，

$$N^2=b^2d^2+b^2l^2+d^2l^2,\quad \sqrt{N^2-b^2d^2}=l\sqrt{d^2+d^2}$$

である。この場合も図中に示すように，直接昼光率をそれぞれ$U_H(\text{◺})$，$U_{V1}(\text{◺})$，$U_{V2}(\text{◺})$と表わすことにする。上記の値を式（2.15）～（2.17）に代入して，図－3.3のような直角三角形光源による直接昼光率を求めると次のようになる。



図－3.3　直角三角形光源

$$U_H(\text{◺})=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bdl(d^2-\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{d^2+l^2})}{\sqrt{d^2+l^2}\{b^2d^2+l^2(b^2+d^2)\}}+\tan^{-1}\frac{bl(\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2}-d^2)}{d(l^2\sqrt{b^2+d^2}+b^2\sqrt{d^2+l^2})}\right\}\right.$$

$$\left.-6\left\{\frac{bd}{\sqrt{b^2d^2+l^2(b^2+d^2)}}\tan^{-1}\frac{\sqrt{b^2d^2+l^2(b^2+d^2)}}{d^2}-\tan^{-1}\frac{b}{d}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots\cdots (3.2\text{a})$$

$$U_{V_1}(\text{◺})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{bl^2\sqrt{b^2+d^2}(\sqrt{N^2+d^4}-d^2)}{N^2\sqrt{N^2+d^4}}+6\frac{bl}{N}\tan^{-1}\frac{N}{d^2}\right]\% \quad \cdots\cdots\cdots (3.2\text{b})$$

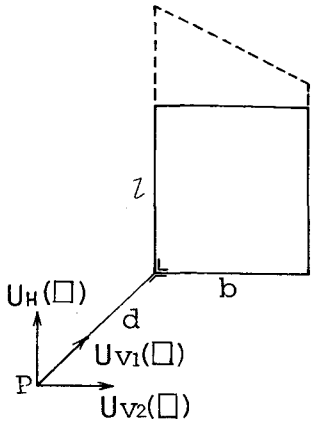
$$U_{V_2}(\text{◺})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{N^2(\sqrt{b^2+d^2}-d)-b^2d(\sqrt{N^2+d^4}-d^2)}{N^2\sqrt{b^2+d^2}}-6\left\{\frac{dl}{N}\tan^{-1}\frac{N}{d^2}-\tan^{-1}\frac{l}{d}\right\}\right]\% \cdots (3.2\text{c})$$

3.1.3　長方形光源

$l_1 = l_2 = l$ の場合，光源は図－3.4のように，長方形となる。直接昼光率をそれぞれU_H(□)，U_{V1}(□)，U_{V2}(□)と書くことにする。

$$N^2 = b^2(d^2 + l^2)$$

であるから，式(2.15)～(2.17)に上記の値を代入して，図－3.4のような長方形光源による直接昼光率を求めると次のようである。



図－3.4　長方形光源

$$U_H(\square) = \frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\tan^{-1}\frac{bl}{d\sqrt{b^2+d^2+l^2}} - \frac{bdl}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right\}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{b}{d} - \frac{d}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots (3.3\mathrm{a})$$

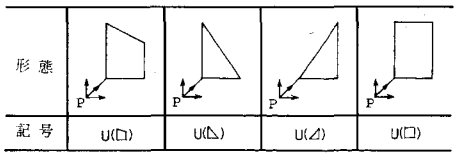
$$U_{V1}(\square) = \frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b\{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2} - d^2\sqrt{b^2+d^2}\}}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots (3.3\mathrm{b})$$

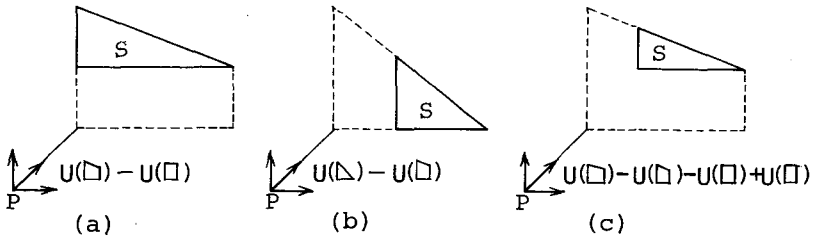
$$U_{V2}(\square) = \frac{100}{28\pi}\left[8\frac{\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{d^2+l^2}(d+\sqrt{b^2+d^2+l^2}) - d\sqrt{b^2+d^2+l^2}(\sqrt{b^2+d^2}+\sqrt{d^2+l^2})}{\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{l}{d} - \frac{d}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots (3.3\mathrm{c})$$

以上，鉛直な台形光源による3方向の照度ベクトルの値を直接昼光率の形で求め，その特殊な場合として直角三角形，長方形光源に対する同様の値を与える式を導いた。これらを基本形として鉛直な種々の直線辺で構成される光源に対する直接昼光率を求めることができる。例えば，図－3.5のような光源の形態を利用して，図－3.6の(a)～(c)などのSを光源とする場合の点Pにおける直接昼光率を求めることができる。



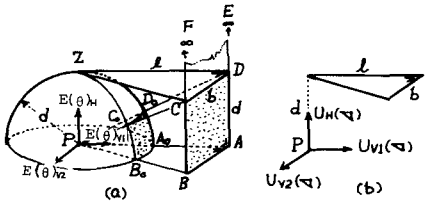
図－3.5　光源の形態と記号



図－3.6　直接昼光率の算定

3.2　水平な直角三角形光源による直接昼光率[1)～3)]

水平な直線形光源の基本形として図-3.7(a)のような直角三角形光源によるP点の直接昼光率の式の誘導を考える。その誘導のために図-3.7(b)の d と同じ半径をもつ半天球面を考え，これに対して中心から l の位置に高さ l，幅 b の天空と同一の輝度分布をもつ光源を仮想する。すなわち，図-3.7(a)で高さが無限の長方形光源 $EABF$，半径 d なる天球面，水平な直角三角形 ZDC がすべて同一の輝度分布 L_θ を持つとすれば，直接照度 $E(\theta)_H$, $E(\theta)_{V1}$ $E(\theta)_{V2}$ はそれぞれについて，



図－3.7

E（□$EABF$）＝E（天球部分 ZA_0B_0）

E（□$EDCF$）＝E（△ZDC）＝E（天球部分 ZD_0C_0）

であるから，下記の関係が成り立つ。

$$E(\triangle ZDC)=E(\text{天球部分}\,ZA_0B_0)-E(\square ABCD) \quad \cdots\cdots (3.4)$$

上式中，E（天球部分 ZA_0B_0）は式（2.6a）～（2.6c）で，$\theta_1=0$，$\theta_2=\pi/2$，$\phi_1=0$，$\phi_2=\tan^{-1}(b/l)$，$\sin\phi_2=b/\sqrt{b^2+l^2}$，$\cos\phi_2=l/\sqrt{b^2+l^2}$ として積分した結果にほかならない。従って次式を得る。

$$E_H\,(\text{天球部分}\ ZA_0B_0)=(L_Z/36)(14\tan^{-1}b/l) \quad \cdots\cdots (a)$$

$$E_{V1}\,(\text{天球部分}\ ZA_0B_0)=(L_Z/36)(8+3\pi)\,b/\sqrt{b^2+l^2} \quad \cdots\cdots (b)$$

$$E_{V2}\,(\text{天球部分}\ ZA_0B_0)=(L_Z/36)(8+3\pi)(1-l/\sqrt{b^2+l^2}) \quad \cdots\cdots (c)$$

この場合の全天空による水平面照度$E_S=7\pi L_Z/9$に対する(a), (b), (c)各式の百分率の値が直接昼光率であるから，天球面上の扇形(ZA_0B_0)に関し，P点の直接昼光率として次式が得られる。

$$U_H\,(\text{天球部分}\,ZA_0B_0)=\frac{100}{28\pi}\left(14\tan^{-1}\frac{b}{l}\right)\ \% \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ \text{(d)}$$

$$U_{V1}\,(\text{天球部分}\,ZA_0B_0)=\frac{100}{28\pi}(3\pi+8)\left(\frac{b}{\sqrt{b^2+l^2}}\right)\ \% \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ \text{(e)}$$

$$U_{V2}\,(\text{天球部分}\,ZA_0B_0)=\frac{100}{28\pi}(3\pi+8)\left(1-\frac{l}{\sqrt{b^2+l^2}}\right)\ \% \quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ \text{(f)}$$

また，$\square ABCD$による直接昼光率は式(3.3a)～(3.3c)において，lとdとを交換することによって求められ，次のようになる。

$$U_H(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\tan^{-1}\frac{bd}{l\sqrt{b^2+d^2+l^2}}-\frac{bdl}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right\}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{b}{l}-\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\%\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ \text{(g)}$$

$$U_{V1}(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b\{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}-l^2\sqrt{b^2+l^2}\}}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\frac{d}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}+\frac{b}{\sqrt{b^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{d}{\sqrt{b^2+l^2}}\right\}\right]\%\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ \text{(h)}$$

$$U_{V2}(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{\sqrt{b^2+l^2}\sqrt{d^2+l^2}(l+\sqrt{b^2+d^2+l^2})-l\sqrt{b^2+d^2+l^2}(\sqrt{b^2+l^2}+\sqrt{d^2+l^2})}{\sqrt{b^2+l^2}\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{d}{l}-\frac{l}{\sqrt{b^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{d}{\sqrt{b^2+l^2}}\right\}\right]\%\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ \text{(i)}$$

水平な直角三角形光源による直接昼光率を$U_H(\triangledown)$，$U_{V1}(\triangledown)$，$U_{V2}(\triangledown)$と表わすことにすると，

$(d)-(g)=U_H(\triangledown)$　　$(e)-(h)=U_{V1}(\triangledown)$　　$(f)-(i)=U_{V2}(\triangledown)$

から直接昼光率を求めることができる。それらを整理して示すと次のようである。

$$U_H(\triangledown)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bdl}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}+\tan^{-1}\frac{bl(\sqrt{b^2+d^2+l^2}-d)}{b^2d+l^2\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right\}\right.$$

$$\left.+6\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right]\%\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (3.5\text{a})$$

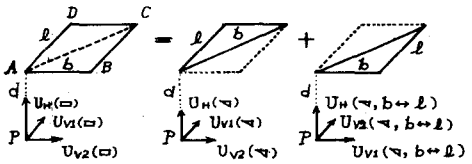
$$U_{V_1}(\triangle)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{bl^2}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\frac{b}{\sqrt{b^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{\sqrt{b^2+l^2}}{d}-\frac{d}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.5b)$$

$$U_{V_2}(\triangle)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l(\sqrt{b^2+d^2+l^2}-\sqrt{d^2+l^2})}{\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}+6\left\{\tan^{-1}\frac{l}{d}-\frac{l}{\sqrt{b^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{\sqrt{b^2+l^2}}{d}\right\}\right]\% \cdots\cdots (3.5c)$$

3.3　水平な長方形光源による直接昼光率[1)～3)]

図-3.8のような水平な長方形光源$ABCD$について考える。長方形光源$ABCD$を直角三角形光源ADC，ABCの2光源の和と考えると，この場合の直接昼光率は同図に示すように，$U(\triangle ABC)$と$U(\triangle ADC)$との和で表わされる。いま，図-3.8　ように寸法を決めれば，$U(\triangle ADC)$は式(3.5a)～(3.5c)で示される。図中の$U_H(\square)$，$U_{V1}(\square)$，$U_{V2}(\square)$を水平な長方形光源$ABCD$によるP点の直接昼光率とし，$U_H(\triangle, b\longrightarrow l)$などはそれぞれ式(3.5a)～(3.5c)中の$l$と$b$とを入れかえたものとすると，



図－3.8

$$U_H(\square)=U_H(\triangle)+U_H(\triangle,\ b\leftrightarrow l)$$

$$U_{V_1}(\square)=U_{V_1}(\triangle)+U_{V_2}(\triangle,\ b\leftrightarrow l)$$

$$U_{V_2}(\square)=U_{V_2}(\triangle)+U_{V_1}(\triangle,\ b\leftrightarrow l)$$

であるから，式(3.5a)～(3.5c)とこれに$b\leftrightarrow l$を施した式とを前述の3式に加え合わすことによって，水平な長方形光源による直接昼光率$U_H(\square)$，$U_{V1}(\square)$，$U_{V2}(\square)$などが下記のように求められる。

$$U_H(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bdl(b^2+2d^2+l^2)}{(b^2+d^2)(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}+\tan^{-1}\frac{bl}{d\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right\}\right.$$

$$\left.+6\left\{\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}+\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.6a)$$

$$U_{V_1}(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b\{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}-d^2\sqrt{b^2+d^2}\}}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{b}{d}-\frac{d}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\% \cdots\cdots (3.6\mathrm{b})$$

$$U_{V_2}(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l\{(d^2+b^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}-d^2\sqrt{d^2+l^2}\}}{(d^2+b^2)\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{l}{d}-\frac{d}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{d^2+b^2}}\right\}\right]\% \cdots\cdots (3.6\mathrm{c})$$

3.4 直接昼光率計算式の極限値[3)]

ここでは，前節までに求めた各式が$d\to 0$，$l\to 0$または$b\to 0$となる極限の値を示す。これらの極限値は実際の計算に使用することは稀であるが，その結果は，これらの値を含めての計算図を作成する場合に必要であり，それらの作業を計算機に遂行させようとする場合には極限式が必要である。また既に経過の中途でみられたように，式の誘導が煩雑であり，それらの極限値のうちのあるものは検算の役目を果たしている。例えば，$U_H(\square)$，$U_H(\triangleright)$などは$d\to 0$に対して当然25％の極限値をもつべきであり，$U_H(\square)$も同様である。ここでは式(3.1a)～(3.6c)について，$d\to 0$；$l\to\infty$；$b\to\infty$；$b\to\infty$，$l\to\infty$などの場合を求める。

各式の極限における式を$U_H(\triangle,\ d\to 0)$，$U_{V_1}(\square,\ b\to\infty)$などのように書くことにする。

$$U_H(\triangle,\ d\to 0)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\tan^{-1}\frac{l}{b}-\frac{bl}{b^2+l^2}\right\}+3\pi\frac{\sqrt{b^2+l^2}-b}{\sqrt{b^2+l^2}}\right]\% \cdots\cdots (3.7)$$

$$U_{V_1}(\triangle,\ d\to 0)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{\sqrt{b^2+l^2}-b}{\sqrt{b^2+l^2}}+6\tan^{-1}\frac{l}{b}\right]\% \cdots\cdots (3.8)$$

$$U_{V_2}(\triangle,\ d\to 0)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l}{\sqrt{b^2+l^2}}+3\pi\right]\frac{l}{\sqrt{b^2+l^2}}\% \cdots\cdots (3.9)$$

$$U_H(\square,\ l\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bd}{b^2+d^2}+\tan^{-1}\frac{b}{d}\right\}+3\pi\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}\right]\% \cdots\cdots (3.10)$$

$$U_{V_1}(\square,\ l\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}+6\tan^{-1}\frac{b}{d}\right]\% \cdots\cdots (3.11)$$

$$U_{V_2}(\square,\ l\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b^2}{b^2+d^2}+3\pi\frac{\sqrt{b^2+d^2}-d}{\sqrt{b^2+d^2}}\right]\% \quad\cdots\cdots (3.12)$$

$$U_H(\square,\ b\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{-dl}{d^2+l^2}+\tan^{-1}\frac{l}{d}\right\}+3\pi\frac{\sqrt{d^2+l^2}-d}{\sqrt{d^2+l^2}}\right]\% \quad\cdots\cdots (3.13)$$

$$U_{V_1}(\square,\ b\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\left\{8\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}+3\pi\right\}\right]\% \quad\cdots\cdots (3.14)$$

$$U_{V_2}(\square,\ b\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{\sqrt{d^2+l^2}-d}{\sqrt{d^2+l^2}}+6\tan^{-1}\frac{l}{d}\right]\% \quad\cdots\cdots (3.15)$$

$$U_H(\triangleleft,\ b\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{dl}{d^2+l^2}+\tan^{-1}\frac{l}{d}\right\}+3\pi\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\right]\% \quad\cdots\cdots (3.16)$$

$$U_{V_1}(\triangleleft,\ b\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l^2}{d^2+l^2}+3\pi\frac{\sqrt{d^2+l^2}-d}{\sqrt{d^2+l^2}}\right]\% \quad\cdots\cdots (3.17)$$

$$U_{V_2}(\triangleleft,\ b\to\infty)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}+6\tan^{-1}\frac{l}{d}\right]\% \quad\cdots\cdots (3.18)$$

$$U_H(\square,\ d\to 0)=25\ \% \quad\cdots\cdots (3.19)$$

$$U_{V_1}(\square,\ d\to 0)=\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\ \% \quad\cdots\cdots (3.20)$$

$$U_{V_2}(\square,\ d\to 0)=\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\ \% \quad\cdots\cdots (3.21)$$

$U(\square,\ {}^{b\to\infty}_{l\to\infty})$ に対しては，式(3.13)～(3.15)を使用して求める。

$$U_H(\square,\ {}^{b\to\infty}_{l\to\infty})=25\ \% \quad\cdots\cdots (3.22)$$

$$U_{V_1}(\square,\ {}^{b\to\infty}_{l\to\infty})=\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\ \% \quad\cdots\cdots (3.23)$$

$$U_{V_2}(\square,\ {}^{b\to\infty}_{l\to\infty})=\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\ \% \quad\cdots\cdots (3.24)$$

$U(\triangleleft,\ {}^{b\to\infty}_{l\to\infty})$ に対しては，式(3.16)～(3.18)を使用して求める。この場合，$b\to\infty$

の後に $l \to \infty$ として求める。

$$U_H\left(\triangledown,\ \begin{matrix} b \to \infty \\ l \to \infty \end{matrix}\right) = 25\ \% \quad \cdots\cdots (3.25)$$

$$U_{V1}\left(\triangledown,\ \begin{matrix} b \to \infty \\ l \to \infty \end{matrix}\right) = \frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\ \% \quad \cdots\cdots (3.26)$$

$$U_{V2}\left(\triangledown,\ \begin{matrix} b \to \infty \\ l \to \infty \end{matrix}\right) = \frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\ \% \quad \cdots\cdots (3.27)$$

以上の計算結果を一括して表-3.1に示す。

表-3.1　$U(\theta)$の極限値(%)

	(1)　$d\to 0$	(2)　$l\to\infty$	(3)　$b\to\infty$	(4)　$b\to\infty,\ l\to\infty$
U_H(▯)	25.	$\frac{50}{\pi}\tan^{-1}\frac{b}{d}$	(3.13)式	25.
U_{V1}(▯)	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}$	(3.14)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$
U_{V2}(▯)	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{\sqrt{b^2+d^2}-d}{\sqrt{b^2+d^2}}$	(3.15)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$
U_H(◺)	25.	$\frac{50}{\pi}\tan^{-1}\frac{b}{d}$	(3.13)式	25.
U_{V1}(◺)	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}$	(3.14)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$
U_{V2}(◺)	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{\sqrt{b^2+d^2}-d}{\sqrt{b^2+d^2}}$	(3.15)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$
U_H(◿)	(3.7)式	$\frac{50}{\pi}\tan^{-1}\frac{b}{d}$	0	25.
U_{V1}(◿)	(3.8)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}$	0	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$
U_{V2}(◿)	(3.9)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{\sqrt{b^2+d^2}-d}{\sqrt{b^2+d^2}}$	0	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$
U_H(◹)	$\frac{50}{\pi}\tan^{-1}\frac{b}{l}$	0	(3.16)式	25.*
U_{V1}(◹)	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{b}{\sqrt{b^2+l^2}}$	0	(3.17)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$*
U_{V2}(◹)	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{\sqrt{b^2+l^2}-l}{\sqrt{b^2+l^2}}$	0	(3.18)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$*
U_H(▭)	25.	(3.10)式	(3.16)式	25.
U_{V1}(▭)	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$	(3.11)式	(3.17)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$
U_{V2}(▭)	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$	(3.12)式	(3.18)式	$\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)$

* U_H(◹) については $b\to\infty$ ののち $l\to\infty$

3.5　水平面直接昼光率の計算図表と計算例[4)～6)]

3.5.1　水平面直接昼光率の計算図表

前節までに，天空輝度が高度θに応じて変化し，方位角ϕに関して，その分布が$L_\theta = L_Z(1+2\sin\theta)/3$，$L_Z$＝天頂輝度，を示す場合に対して簡単な直線形態をもつ光源による直接昼光率を求める計算式を導いた。それらの式は一様な天空輝度を仮定した場合の計算式より複雑で，利用の簡便化のためには，適当な数表化または図表化が必要と考えられる。ここでは，前節までに誘導した諸式のうち，水平面照度に関するものの計算図表をあげ，応用例として求めた鉛直長方形開口による水平面直接昼光率の分布計算例を示す。

計算図表を作成した式は下記の(3.28)～(3.31)の各式で，これらはそれぞれ表－3.2に示す光源による直接昼光率を与えるものである。

$$U_H(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\tan^{-1}\frac{bl}{d\sqrt{b^2+d^2+l^2}}-\frac{bdl}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right\}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{b}{d}-\frac{d}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots (3.28)$$

$$U_H(\triangle)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bdl(d^2-\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{d^2+l^2})}{\sqrt{d^2+l^2}\{b^2d^2+l^2(b^2+d^2)\}}+\tan^{-1}\frac{bl(\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2}-d^2)}{d(l^2\sqrt{b^2+d^2}+b^2\sqrt{d^2+l^2})}\right\}\right.$$

$$\left.-6\left\{\frac{bd}{\sqrt{b^2d^2+l^2(b^2+d^2)}}\tan^{-1}\frac{\sqrt{b^2d^2+l^2(b^2+d^2)}}{d^2}-\tan^{-1}\frac{b}{d}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots (3.29)$$

$$U_H(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bdl(b^2+2d^2+l^2)}{(b^2+d^2)(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}+\tan^{-1}\frac{bl}{d\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right\}\right.$$

$$\left.+6\left\{\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}+\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\% \quad \cdots\cdots (3.30)$$

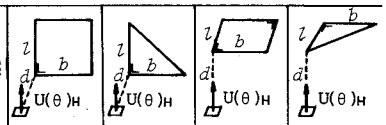
$$U_H(\triangle)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bdl}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}+\tan^{-1}\frac{bl(\sqrt{b^2+d^2+l^2}-d)}{b^2d+l^2\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right\}\right.$$

$$\left.+6\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right]\% \quad \cdots\cdots (3.31)$$

図表作成にはdを単位として，両軸にl，bをとり，水平面直接昼光率$U(\theta)_H$の一定

値に対する曲線群を描く方法をとることにした。作図に当たっての両軸の刻み目は，$y=\tan^{-1}x$ のスケールを利用し，d を単位として表わした b または l の値を x にとり，図の左下端から軸上の b または l 値を示す点までの距離を y に比例するものとした。

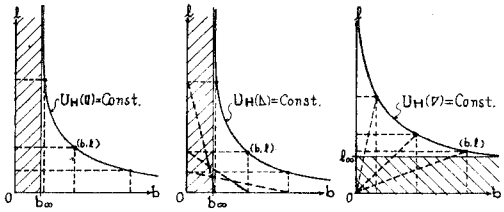
表－3.2　光源の形態と記号

形態				
記号	UH(□)	UH(◺)	UH(▭)	UH(◹)
式	(2.28)	(3.29)	(3.30)	(3.31)
図	3.10	3.11	3.12	3.13

式(3.28)～(3.31)は d を単位として，b，l を表わすことにすると，一般に $U(\theta)_H=(100/28\pi)\cdot F(b,l)$ の形に書くことができ，一定の $U(\theta)_H$ の値に対して，この式を満足する (b,l) の組合わせを多数求めて，上述のような曲線群を描くことになる。このような b と l との組合わせを求めることは，$28\pi\cdot U_H(\theta)/100=u$ とおいて，

$$u-F(b,l)=0 \quad \cdots\cdots \text{(a)}$$

において，u の一定値毎に一群の b を仮定して式(a)を解くことにほかならない。その際，手順として，図－3.9を考えておく必要がある。$l\to\infty$ のときの b の値を b_∞ と表わすと，ある一定値 u に対して，(a)の解 l は b_∞ より小さい b 値に対して存在しないことを示している。$b\to\infty$ に対する l 値(l_∞)に関しても同様のことが考えられる。



図－3.9

b_∞（または l_∞）の値は式(3.28)～(3.31)において l（または b）$\to\infty$ として得られる式(3.32)～(3.34)について，d を単位として $U(\theta)_H$ の一定値毎に計算することができる。

$$U_H(\square)=U_H(◺)=\frac{50}{\pi}\tan^{-1}\frac{b_\infty}{d}\ \% \quad \cdots\cdots (3.32)$$

$$U_H(▭)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{bd}{b_\infty^2+d^2}+\tan^{-1}\frac{b_\infty}{d}\right\}+3\pi\cdot\frac{b_\infty}{\sqrt{b_\infty^2+d^2}}\right]\ \% \quad \cdots\cdots (3.33)$$

$$U_H(▽)=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{\frac{dl_\infty}{d^2+l_\infty^2}+\tan^{-1}\frac{l_\infty}{d}\right\}+3\pi\cdot\frac{l_\infty}{\sqrt{d^2+l_\infty^2}}\right]\ \% \quad \cdots\cdots (3.34)$$

各式に関する計算では b（または l）を

$b=b_\infty+b_n$ ， $b_n=0.05$， 0.1…0.2， 0.3…0.6， 0.8， 1.0， 1.5， 2.0…3， 4…6， 8， 10…20 （計24個）

または $l=l_\infty+l_n$ ， l_n は b_n と同様の値とした。

(a)式の解 l （または b ）を求める計算は出発値を1として， Newton 近似法により，(a)式の左辺を HF とおいて

$$l_{n+1}=l_n-HF/F' \quad \cdots\cdots \text{(b)}$$

として計算する。その経過において，(b)式の右辺第二項の絶対値が 10^{-6} より大であれば，さらに(b)式による新しい値 l_{n+1} を計算することを継続し，10^{-6} より小であれば計算を停止して，最後の l_{n+1} を l （または b ）の値として採用し，（b ，l_{n+1} ）が求めるべき曲線上の1点であるものとした。

式(a)の u の値，式(3.32)〜(3.34)における b_∞（または l_∞）の値は表-3.3 のようである。

以上の手順に従って，式(3.28)〜(3.31)を計算した結果をプロットしたものを，それぞれ図-3.10 〜図-3.13 に示す。

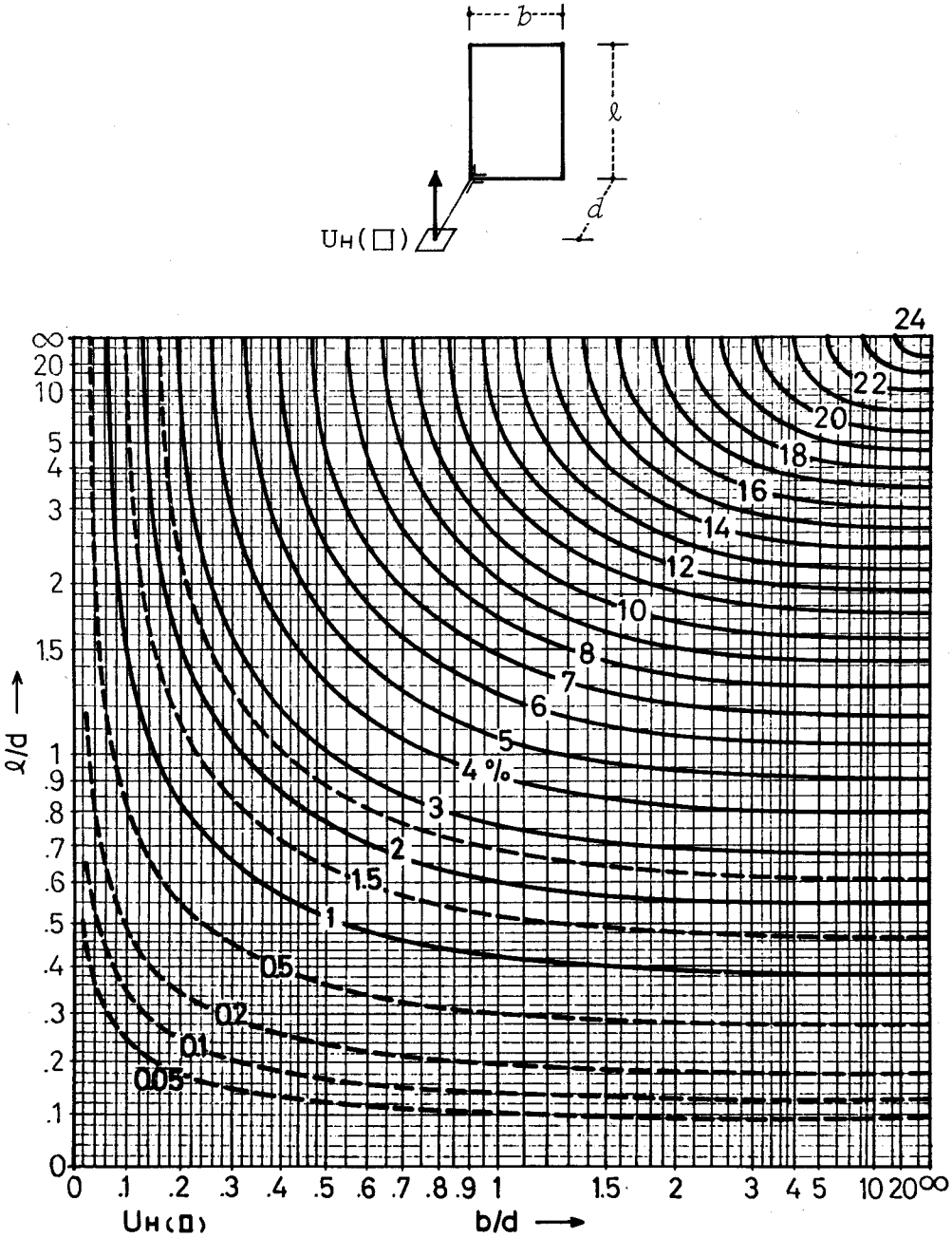
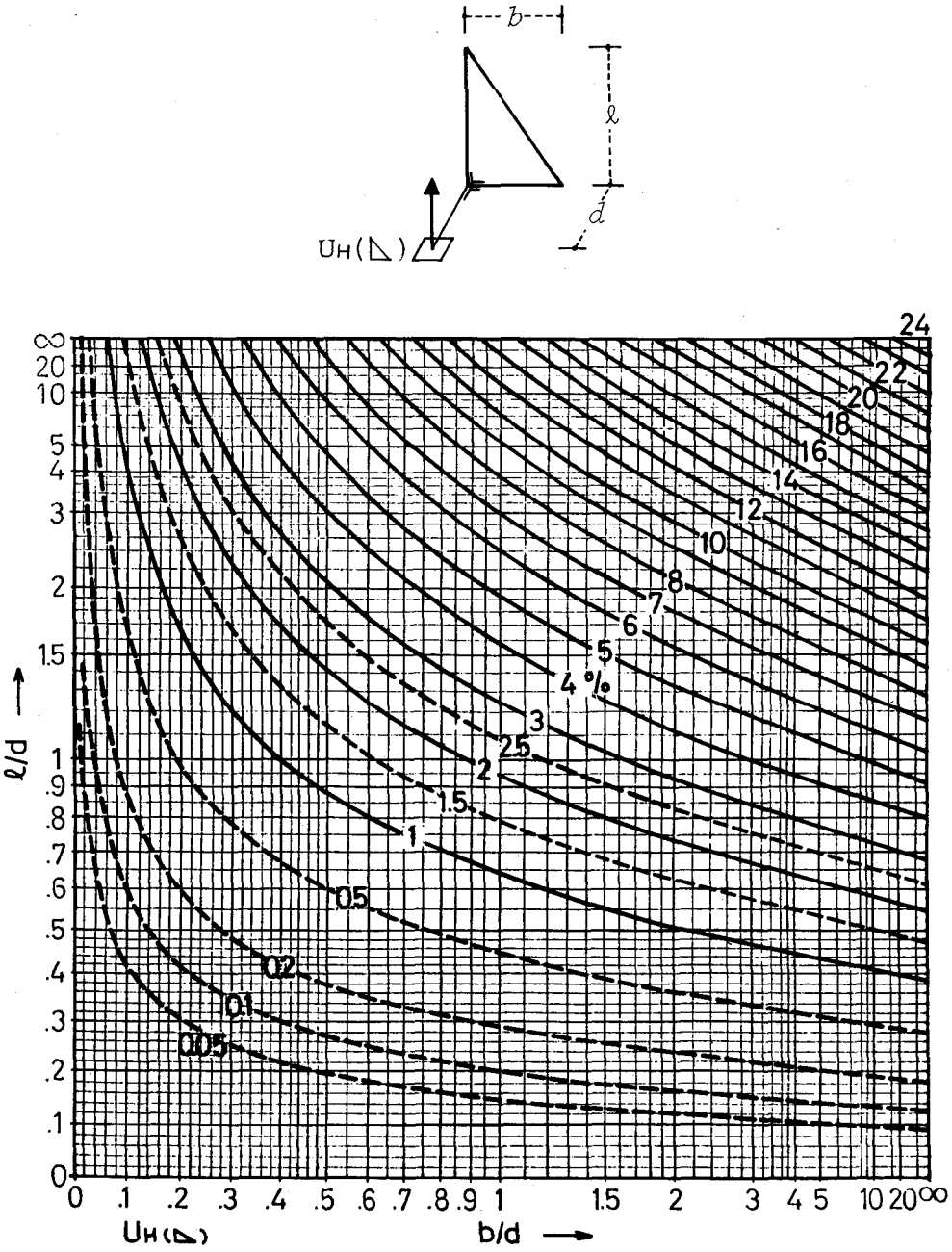
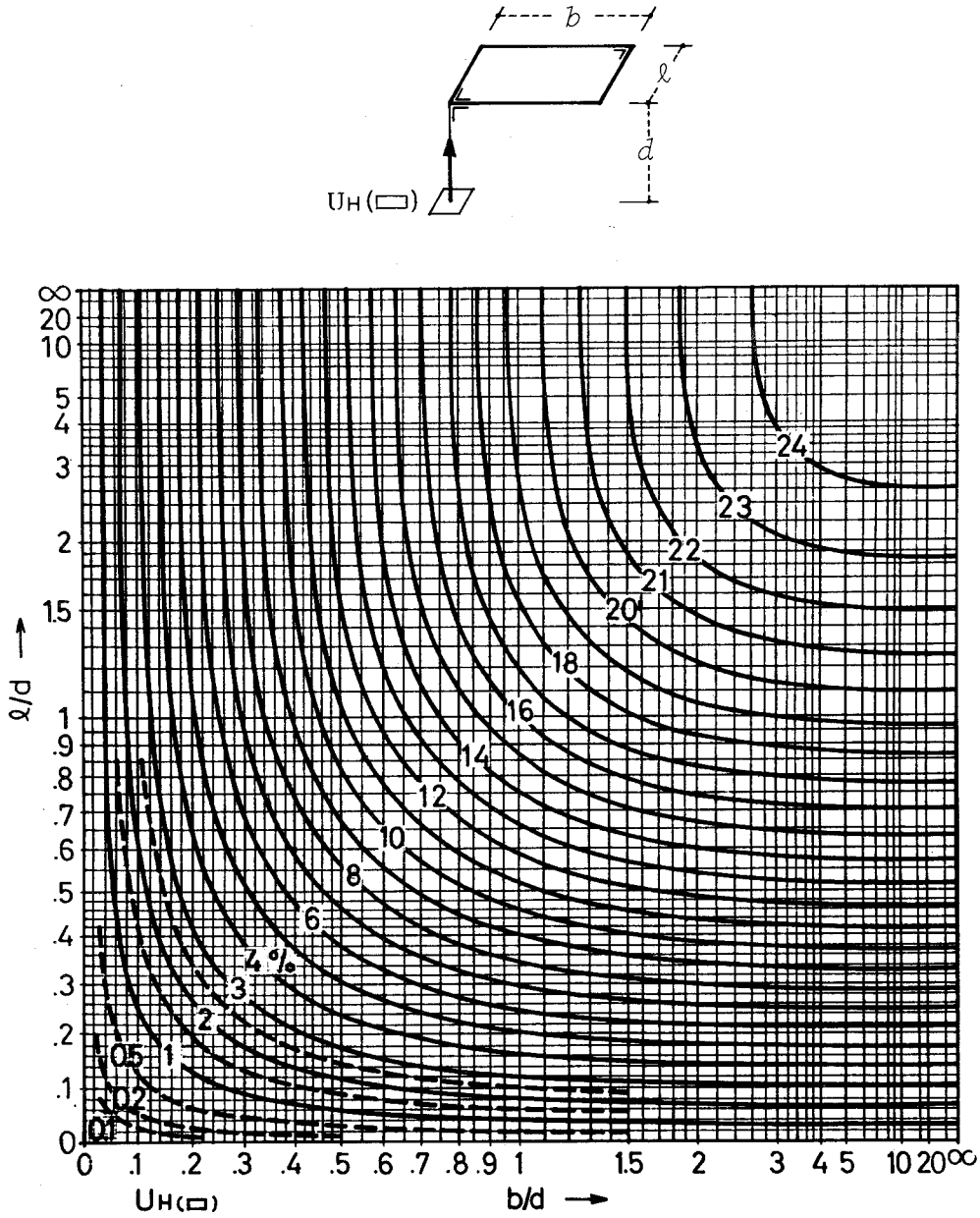


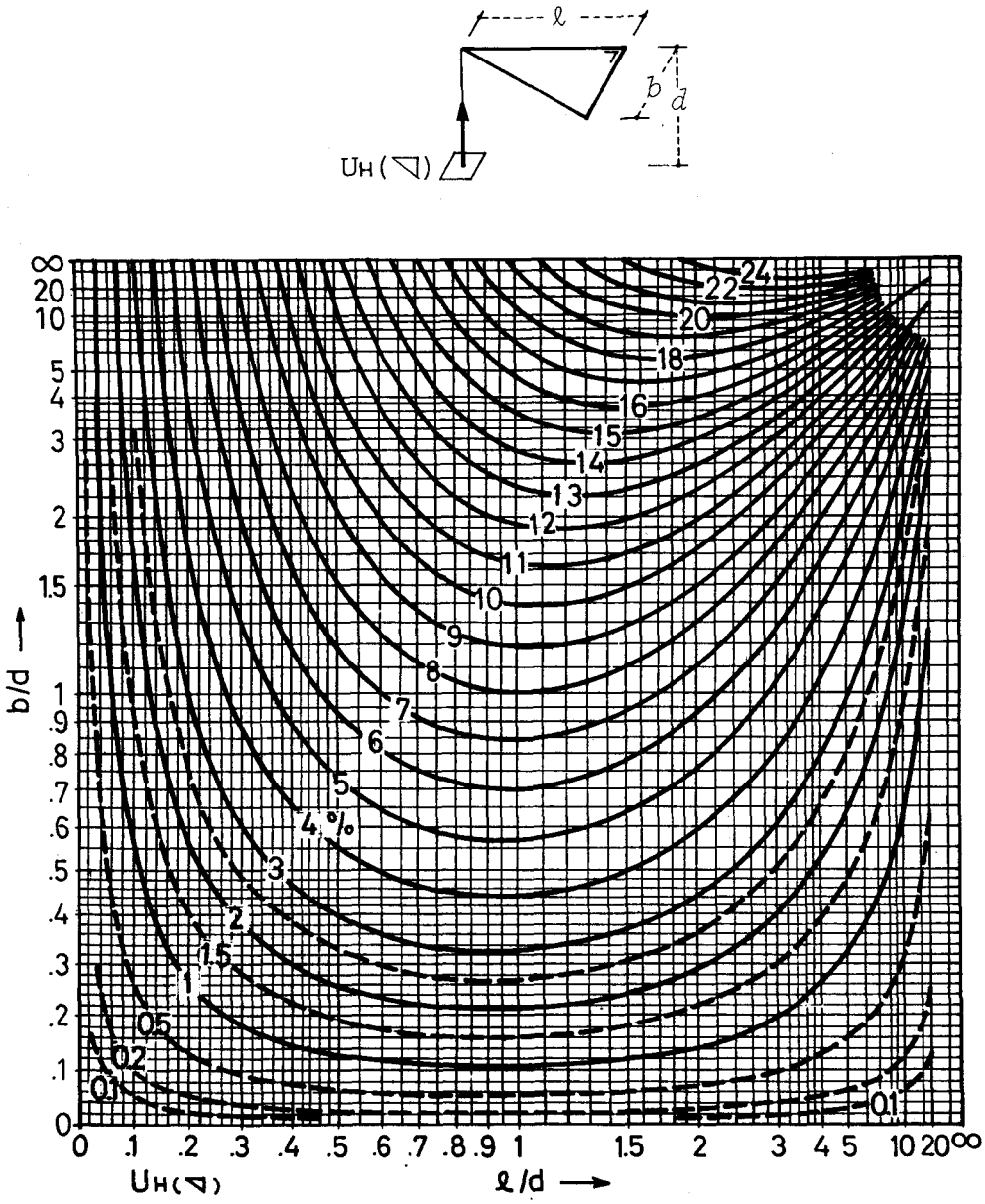
図-3.10　鉛直長方形光源による水平面直接昼光率算定図表



図－3.11　鉛直直角三角形光源による
水平面直接昼光率算定図表



図－3.12　水平長方形光源による水平面直接昼光率算定図表



図－3.13　水平直角三角形光源による
水平面直接昼光率算定図表

表－3.3　$U(\theta)_H$ の各値に対する u，b_∞ (l_∞) の値

U(θ)H [%]	u	b∞		l∞	U(θ)H [%]	u	b∞		l∞
		UH(□) UH(◺)	UH(▭)	UH(◹)			UH(□) UH(◺)	UH(▭)	UH(◹)
0.05	0.0440	0.0031	0.0017	0.0017	9.0	7.9168	0.6346	0.3315	0.3315
0.10	0.0880	0.0063	0.0035	0.0035	10.0	8.7965	0.7265	0.3743	0.3743
0.15	0.1319	0.0094	0.0052	0.0052	11.0	9.6761	0.8273	0.4194	0.4194
0.20	0.1759	0.0126	0.0069	0.0069	12.0	10.5558	0.9391	0.4673	0.4673
0.50	0.4398	0.0314	0.0173	0.0173	13.0	11.4354	1.0649	0.5186	0.5186
1.00	0.8796	0.0629	0.0346	0.0346	14.0	12.3150	1.2088	0.5740	0.5740
1.50	1.3195	0.0945	0.0520	0.0520	15.0	13.1947	1.3764	0.6347	0.6347
2.00	1.7593	0.1263	0.0694	0.0694	16.0	14.0743	1.5757	0.7021	0.7021
2.50	2.1991	0.1584	0.0869	0.0869	17.0	14.9540	1.8190	0.7780	0.7780
3.00	2.6389	0.1908	0.1045	0.1045	18.0	15.8336	2.1251	0.8655	0.8655
4.00	3.5186	0.2568	0.1400	0.1400	19.0	16.7133	2.5257	0.9689	0.9689
5.00	4.3982	0.3249	0.1762	0.1762	20.0	17.5929	3.0777	1.0957	1.0957
6.00	5.2779	0.3959	0.2132	0.2132	21.0	18.4726	3.8947	1.2590	1.2590
7.00	6.1575	0.4706	0.2513	0.2513	22.0	19.3522	5.2422	1.4860	1.4860
8.00	7.0372	0.5498	0.2906	0.2906	23.0	20.2319	7.9158	1.8458	1.8458
					24.0	21.1115	15.8945	2.6079	2.6079

表－3.4　U_H（□，l = const）の値 (%)

l=2.0

d \ b	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.1	21.6092	22.9462	23.2983	23.4290	23.4865	23.5148	23.5301	23.5390	23.5444	23.5479	23.5502	23.5518	23.5529	23.5538
0.2	18.4501	20.9307	21.6155	21.8728	21.9866	22.0429	22.0734	22.0910	22.1018	22.1087	22.1134	22.1166	22.1189	22.1205
0.3	15.6683	18.9883	19.9697	20.3458	20.5136	20.5971	20.6423	20.6686	20.6847	20.6950	20.7020	20.7068	20.7102	20.7127
0.4	13.3056	17.1466	18.3772	18.8610	19.0795	19.1890	19.2485	19.2832	19.3045	19.3182	19.3275	19.3338	19.3384	19.3417
0.5	11.3343	15.4255	16.8516	17.4298	17.6949	17.8288	17.9021	17.9449	17.9713	17.9883	17.9998	18.0077	18.0134	18.0175
0.6	9.6984	13.8363	15.4039	16.0617	16.3686	16.5252	16.6114	16.6620	16.6933	16.7135	16.7272	16.7366	16.7434	16.7483
0.7	8.3385	12.3837	14.0420	14.7640	15.1073	15.2846	15.3830	15.4410	15.4770	15.5003	15.5161	15.5270	15.5348	15.5406
0.8	7.2024	11.0666	12.7709	13.5417	13.9161	14.1119	14.2214	14.2864	14.3269	14.3532	14.3710	14.3834	14.3923	14.3988
0.9	6.2475	9.8801	11.5930	12.3980	12.7978	13.0099	13.1296	13.2010	13.2458	13.2750	13.2948	13.3086	13.3185	13.3257
1.0	5.4402	8.8164	10.5081	11.3339	11.7538	11.9798	12.1086	12.1860	12.2348	12.2667	12.2884	12.3035	12.3144	12.3224
1.2	4.1674	7.0212	8.6082	9.4418	9.8864	10.1334	10.2773	10.3651	10.4209	10.4579	10.4831	10.5008	10.5136	10.5230
1.4	3.2310	5.6040	7.0403	7.8475	8.2990	8.5584	8.7130	8.8090	8.8709	8.9121	8.9405	8.9606	8.9751	8.9858
1.6	2.5323	4.4911	5.7617	6.5204	6.9650	7.2292	7.3906	7.4927	7.5593	7.6042	7.6353	7.6574	7.6736	7.6855
1.8	2.0050	3.6186	4.7265	5.4249	5.8525	6.1152	6.2799	6.3860	6.4562	6.5041	6.5375	6.5615	6.5790	6.5921
2.0	1.6030	2.9339	3.8917	4.5251	4.9291	5.1855	5.3504	5.4586	5.5313	5.5814	5.6168	5.6423	5.6611	5.6752
2.2	1.2936	2.3948	3.2192	3.7878	4.1643	4.4109	4.5734	4.6821	4.7564	4.8081	4.8450	4.8718	4.8917	4.9066
2.4	1.0534	1.9686	2.6769	3.1837	3.5312	3.7655	3.9237	4.0316	4.1064	4.1592	4.1972	4.2251	4.2458	4.2616
2.6	0.8653	1.6298	2.2384	2.6883	3.0065	3.2271	3.3795	3.4854	3.5600	3.6134	3.6522	3.6808	3.7023	3.7186
2.8	0.7167	1.3589	1.8826	2.2809	2.5707	2.7769	2.9225	3.0257	3.0994	3.1528	3.1920	3.2211	3.2432	3.2601
3.0	0.5984	1.1409	1.5926	1.9449	2.2079	2.3995	2.5376	2.6373	2.7096	2.7626	2.8019	2.8314	2.8539	2.8712
3.2	0.5033	0.9643	1.3551	1.6666	1.9047	2.0819	2.2124	2.3080	2.3785	2.4308	2.4699	2.4996	2.5224	2.5400
3.4	0.4264	0.8204	1.1595	1.4352	1.6504	1.8139	1.9364	2.0278	2.0961	2.1473	2.1861	2.2158	2.2387	2.2565
3.6	0.3637	0.7022	0.9976	1.2419	1.4363	1.5867	1.7015	1.7884	1.8542	1.9042	1.9424	1.9719	1.9948	2.0128
3.8	0.3121	0.6046	0.8628	1.0798	1.2552	1.3935	1.5007	1.5830	1.6462	1.6947	1.7322	1.7614	1.7842	1.8023
4.0	0.2695	0.5234	0.7500	0.9430	1.1016	1.2285	1.3283	1.4062	1.4666	1.5136	1.5502	1.5789	1.6016	1.6196
4.2	0.2340	0.4556	0.6551	0.8272	0.9706	1.0870	1.1799	1.2533	1.3110	1.3562	1.3919	1.4201	1.4425	1.4604
4.4	0.2042	0.3985	0.5749	0.7287	0.8585	0.9653	1.0516	1.1207	1.1755	1.2191	1.2537	1.2812	1.3033	1.3211
4.6	0.1791	0.3502	0.5067	0.6445	0.7621	0.8601	0.9403	1.0052	1.0573	1.0991	1.1325	1.1594	1.1811	1.1986
4.8	0.1579	0.3092	0.4485	0.5722	0.6790	0.7689	0.8434	0.9043	0.9537	0.9937	1.0260	1.0521	1.0734	1.0907
5.0	0.1397	0.2741	0.3985	0.5099	0.6070	0.6896	0.7587	0.8158	0.8626	0.9008	0.9319	0.9573	0.9781	0.9951
5.5	0.1048	0.2063	0.3014	0.3881	0.4651	0.5321	0.5895	0.6381	0.6787	0.7126	0.7408	0.7641	0.7835	0.7997
6.0	0.0804	0.1586	0.2327	0.3011	0.3629	0.4177	0.4655	0.5067	0.5419	0.5719	0.5971	0.6184	0.6364	0.6515
6.5	0.0629	0.1244	0.1830	0.2377	0.2878	0.3329	0.3729	0.4080	0.4385	0.4648	0.4873	0.5066	0.5231	0.5372
7.0	0.0501	0.0991	0.1462	0.1905	0.2316	0.2690	0.3027	0.3326	0.3590	0.3821	0.4022	0.4196	0.4347	0.4477
7.5	0.0404	0.0802	0.1185	0.1548	0.1888	0.2201	0.2486	0.2742	0.2971	0.3174	0.3352	0.3509	0.3646	0.3766

表-3.4 （つづき）

l=3.0

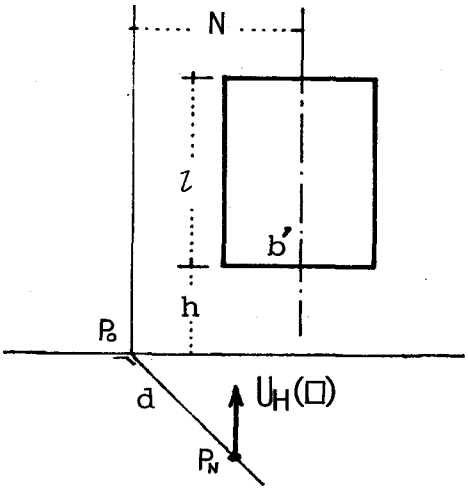
d \ b	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.1	21.7460	23.1958	23.6284	23.8117	23.9024	23.9517	23.9803	23.9979	24.0091	24.0165	24.0216	24.0252	24.0278	24.0297
0.2	18.7202	21.4241	22.2683	22.6301	22.8099	22.9079	22.9648	22.9997	23.0221	23.0369	23.0471	23.0542	23.0594	23.0632
0.3	16.0654	19.7140	20.9307	21.4615	21.7274	21.8728	21.9576	22.0096	22.0429	22.0651	22.0803	22.0910	22.0987	22.1044
0.4	13.8203	18.0883	19.6258	20.3123	20.6597	20.8508	20.9625	21.0313	21.0754	21.1047	21.1249	21.1391	21.1494	21.1570
0.5	11.9551	16.5628	18.3621	19.1879	19.6112	19.8456	19.9833	20.0683	20.1230	20.1594	20.1844	20.2021	20.2149	20.2244
0.6	10.4121	15.1461	17.1466	18.0935	18.5860	18.8610	19.0235	19.1241	19.1890	19.2323	19.2621	19.2832	19.2984	19.3097
0.7	9.1309	13.8408	15.9849	17.0334	17.5878	17.9003	18.0861	18.2016	18.2763	18.3263	18.3608	18.3852	18.4029	18.4160
0.8	8.0591	12.6451	14.8807	16.0113	16.6197	16.9664	17.1739	17.3035	17.3876	17.4441	17.4831	17.5107	17.5308	17.5457
0.9	7.1541	11.5541	13.8363	15.0299	15.6845	16.0617	16.2892	16.4321	16.5252	16.5878	16.6312	16.6620	16.6844	16.7010
1.0	6.3829	10.5612	12.8527	14.0916	14.7843	15.1884	15.4341	15.5893	15.6908	15.7593	15.8069	15.8408	15.8654	15.8837
1.2	5.1454	8.8401	11.0666	12.3489	13.0950	13.5417	13.8182	13.9951	14.1119	14.1913	14.2468	14.2864	14.3153	14.3369
1.4	4.2036	7.4217	9.5123	10.7875	11.5595	12.0344	12.3342	12.5287	12.6585	12.7475	12.8100	12.8549	12.8878	12.9124
1.6	3.4699	6.2521	8.1712	9.4034	10.1784	10.6687	10.9844	11.1925	11.3330	11.4301	11.4988	11.5484	11.5850	11.6124
1.8	2.8883	5.2855	7.0212	8.1871	8.9474	9.4418	9.7670	9.9846	10.1334	10.2372	10.3112	10.3651	10.4049	10.4349
2.0	2.4210	4.4846	6.0391	7.1255	7.8582	8.3476	8.6762	8.8998	9.0546	9.1638	9.2423	9.2997	9.3424	9.3747
2.2	2.0418	3.8191	5.2026	6.2036	6.8999	7.3771	7.7043	7.9307	8.0894	8.2026	8.2846	8.3450	8.3903	8.4247
2.4	1.7316	3.2646	4.4911	5.4059	6.0606	6.5204	6.8421	7.0683	7.2292	7.3450	7.4298	7.4927	7.5400	7.5762
2.6	1.4761	2.8011	3.8862	4.7174	5.3279	5.7666	6.0796	6.3034	6.4646	6.5820	6.6687	6.7335	6.7826	6.8203
2.8	1.2644	2.4126	3.3718	4.1240	4.6896	5.1050	5.4069	5.6262	5.7864	5.9043	5.9922	6.0584	6.1088	6.1478
3.0	1.0881	2.0859	2.9339	3.6127	4.1343	4.5251	4.8144	5.0277	5.1855	5.3031	5.3914	5.4586	5.5101	5.5501
3.2	0.9405	1.8103	2.5605	3.1723	3.6515	4.0174	4.2928	4.4990	4.6536	4.7699	4.8582	4.9258	4.9780	5.0188
3.4	0.8165	1.5771	2.2416	2.7925	3.2317	3.5729	3.8339	4.0322	4.1826	4.2971	4.3848	4.4524	4.5051	4.5464
3.6	0.7118	1.3790	1.9686	2.4646	2.8665	3.1837	3.4301	3.6198	3.7655	3.8776	3.9642	4.0316	4.0843	4.1260
3.8	0.6230	1.2102	1.7344	2.1811	2.5484	2.8427	3.0745	3.2554	3.3959	3.5051	3.5903	3.6571	3.7097	3.7516
4.0	0.5474	1.0659	1.5328	1.9355	2.2711	2.5436	2.7612	2.9330	3.0680	3.1741	3.2575	3.3234	3.3757	3.4175
4.2	0.4828	0.9421	1.3589	1.7223	2.0288	2.2809	2.4847	2.6475	2.7769	2.8795	2.9609	3.0257	3.0775	3.1191
4.4	0.4274	0.8354	1.2085	1.5368	1.8168	2.0498	2.2404	2.3944	2.5180	2.6170	2.6961	2.7596	2.8107	2.8520
4.6	0.3796	0.7433	1.0780	1.3750	1.6310	1.8463	2.0243	2.1697	2.2875	2.3827	2.4595	2.5215	2.5718	2.6126
4.8	0.3383	0.6635	0.9643	1.2336	1.4677	1.6666	1.8327	1.9698	2.0819	2.1733	2.2476	2.3080	2.3573	2.3976
5.0	0.3025	0.5940	0.8652	1.1096	1.3239	1.5077	1.6627	1.7918	1.8983	1.9858	2.0576	2.1163	2.1645	2.2042
5.5	0.2317	0.4563	0.6676	0.8609	1.0336	1.1847	1.3149	1.4256	1.5189	1.5970	1.6622	1.7165	1.7617	1.7994
6.0	0.1807	0.3565	0.5234	0.6780	0.8182	0.9430	1.0524	1.1472	1.2285	1.2977	1.3565	1.4062	1.4481	1.4836
6.5	0.1431	0.2829	0.4165	0.5415	0.6562	0.7598	0.8521	0.9332	1.0039	1.0650	1.1177	1.1628	1.2015	1.2345
7.0	0.1149	0.2276	0.3358	0.4379	0.5327	0.6192	0.6972	0.7668	0.8283	0.8822	0.9292	0.9700	1.0054	1.0360
7.5	0.0935	0.1854	0.2741	0.3583	0.4372	0.5099	0.5763	0.6361	0.6896	0.7371	0.7790	0.8158	0.8480	0.8762

3.5.2 水平面直接昼光率の計算例

ここでは，最も一般的な形態である鉛直長方形光源に関して水平面直接昼光率の計算を例示し，あるものについては均一輝度の場合と比較してみた。その際の記号の区別をするために，以下においては，標準曇天空輝度分布の場合を $U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$ などと表わし，均一輝度分布の場合を U_H，U_{V1}，U_{V2} などと書くことにする。

〔1〕 鉛直長方形光源（その1）

図－3.14のような鉛直長方形開口による水平面上の直接昼光率 $U(\theta)_H$ の分布計算を行った。図中の $N=0$，0.5，1.0，……に対する直接昼光率を $U_H(N)$ とすれば，一定の h，l に対して



図－3.14

$$U_H(N)=U_H(\square, b=N+0.5b')-U_H(\square, b=N-0.5b') \quad \cdots\cdots (3.35)$$

であり，$U_H(\square, -x)=-U_H(\square, x)$ として取扱えばよい。$U_H(N)$ の値から N の各値に対する受照面上の直線 P_0P_N の上に各百分率値の $U_H(\square)$ に対応する点を定め，同じ百分率値に対応する点を連結して，等（直接）昼光率線（$U_H(\square)$線）を描くことができる。式（3.35）の計算を遂行するには多数の $U_H(\square)$ 値を求めることが必要で，系統的に多数の直接昼光率を求める場合，図－3.10の使用だけではやや不便であるから，表－3.4のような $U_H(\square)$ 値表を別に作成した。この表はその中の $l=2$，$l=3$ の場合を示す。$l=1$ の場合は表－3.4の $l=2$ に対する b，d 値をともに2倍して読めばよく，$l=4$ の場合には同様に b，d 値の0.5倍に対する値を読み取ることにすればよい。

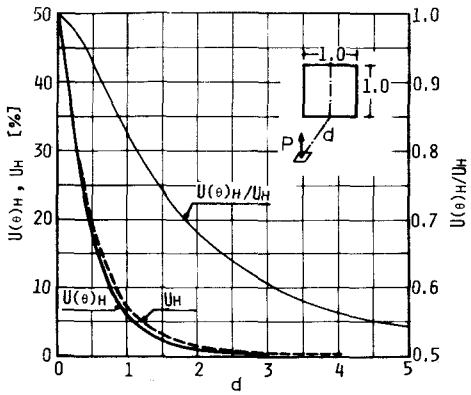
図－3.14において，$N=0$，$h=0$，$l=1$，$b'=1$ とし，光源からの距離 $d=x$ とすると，P_N 点の水平面に関する直接昼光率 $U(\theta)_H$ は次のように表わされる。

$$U(\theta)_H=2\left[U(\theta)_H(\square\ ;\ b=0.5, d=x, l=1.0)\right]$$

図－3.15は $x=0$，0.1，0.2，……，0.5，1.0，……，5.0として計算した結果を均一輝度分布をもつ天空を仮定した場合の計算値 U_H と比較したものである。図中の太い実線は $U(\theta)_H$，破線は U_H，細い実線は $U(\theta)_H/U_H$ の値を示す。この例では，室奥部に進むにつ

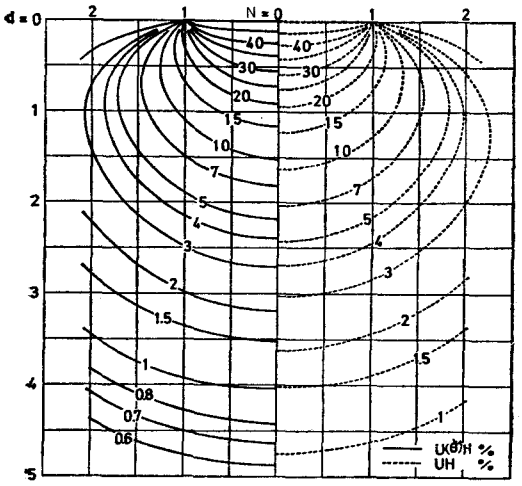
れて，U_H は $U(\theta)_H$ より大きく評価されていることが認められる。

図－3.16 は図－3.14 における $h=0$，$l=b'=2$ に対するもので，図中の実線は等 $U(\theta)_H$ 線，点線は均一天空輝度の場合の同様の等 U_H 線である。図から，室奥に向うにつれて $U(\theta)_H$ と U_H との差が大となり，例えば，開口の中心線上で 2 % の線が開口幅の約¼程度互にずれているのがみられ，U_H は $U(\theta)_H$ より大きく評価されていることがうかがわれる。



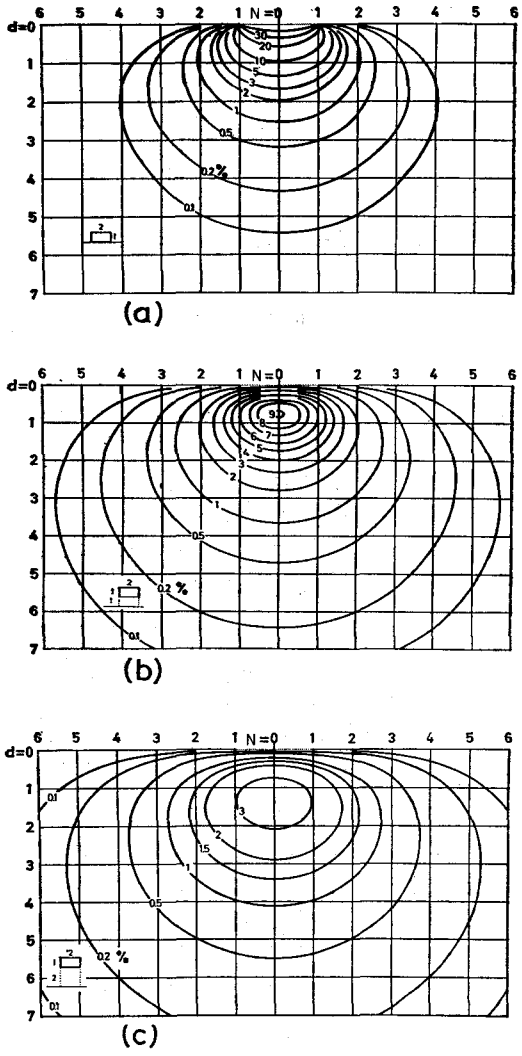
図－3.15　鉛直正方形光源による $U(\theta)_H$，U_H

図－3.17(a)，図－3.18(a)は図－3.14 において，それぞれ $l=1$，$b'=2$，$h=0$；$l=2$，$b'=2$，$h=0$ に対する等 $U(\theta)_H$ 線図である。両図の比較から，同一面積の開口に対して，l が大きい方が室奥部の直接照度維持の点で有利であることが認められる。

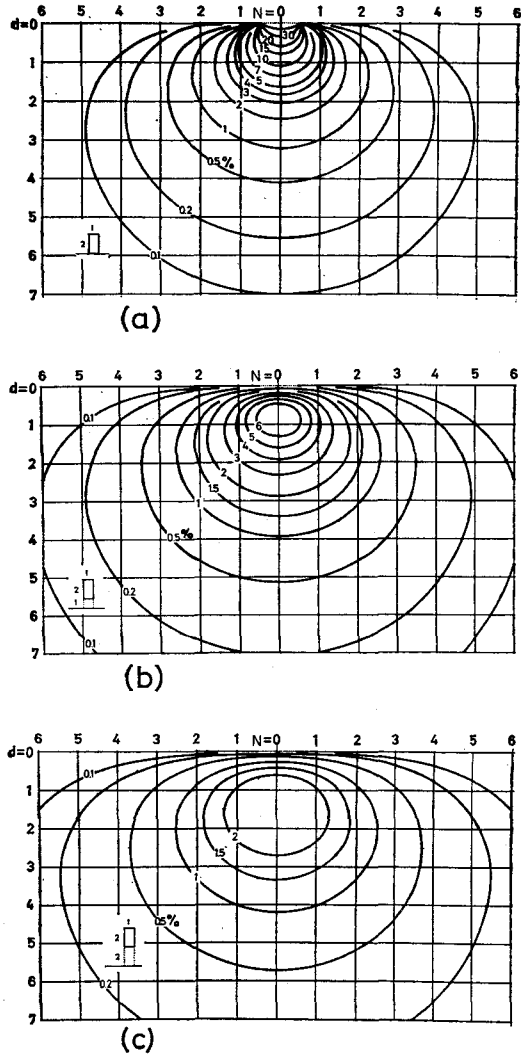


図－3.16　鉛直正方形光源による水平受照面上の $U(\theta)_H$，U_H の分布

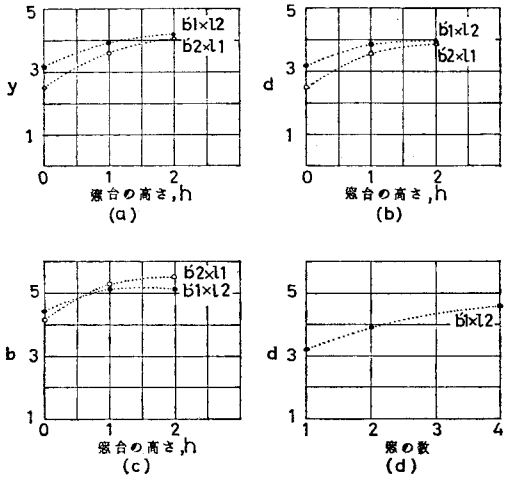
図－3.17(b)，図－3.18(b) はそれぞれ $l=1$，$b'=2$；$l=2$，$b'=1$ で $h=1$ の場合に対する等 $U(\theta)_H$ 線図を示し，図－3.17(c)，図－3.18(c)はそれぞれ上記同様の開口に関する $h=2$ の場合の等 $U(\theta)_H$ 線図を示す。これらの図は図－3.14 において，$(l+h,\ b')$ の分布から，$(h,\ b')$ の分布を差し引くことによって求めたものである。$h=0$，1，2 となるに従って，$h=0$ の場合に比べて，室奥部では同一直接昼光率の等 $U(\theta)_H$ 線が後退していること，分布の最大値が低下していることなどが認められる。



図－3.17　鉛直長方形光源による水平受照面上の $U(\theta)_H$ の分布

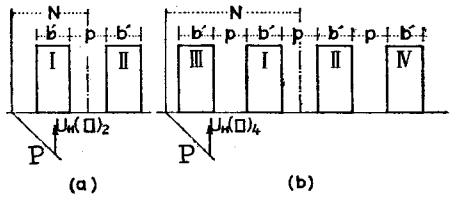


図－3.18　鉛直長方形光源による水平受照面上の $U(\theta)_H$ の分布

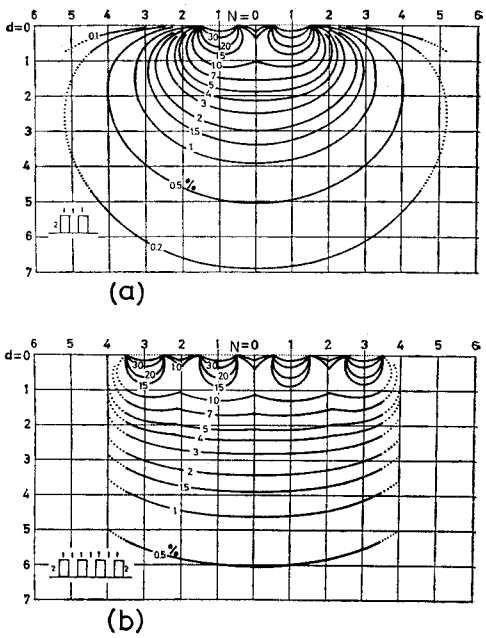


(a) $U_H(\square)=1\%$ 点の開口からの最大距離，y
(b) $U_H(\square)=1\%$ 以上となる部分の奥行方向最大長，d
(c) $U_H(\square)=1\%$ 以上となる部分の最大幅，b
(d) $U_H(\square)=1\%$ 以上となる部分の奥行方向最大長，d

図－3.19



図－3.20



図－3.21　複数の長方形光源による水平受照面上の $U(\theta)_H$ の分布

図－3.19(a)～(d)は以上の各図について，試みに $U(\theta)_H=1\%$ の位置を h に対してプロットした傾向図である。

〔2〕 鉛直長方形光源（その2）

図－3.21(a)は図－3.17(a)と同一の形をもつ採光面が間隔 $p=1$ で，2個併置された場合の分布図である。この場合には図－3.20(a)のように，同形の光源Ⅰ，Ⅱに対して，P点における直接昼光率 $U(\theta)_{H2}$ は光源Ⅰに対しては，式(3.35)にならって，

$$U_1(\theta)_H=U(\square,\ b=N-0.5p)-U(\square,\ b=N-0.5p-b')$$

であり，光源Ⅱに対しては下記のようである。

$$U_2(\theta)_H=U(\square,\ b=N+0.5p+b')-U(\square,\ b=N+0.5p)$$

故に，計算すべきP点の直接昼光率 $U(\theta)_{H2}$ は下記のようになる。

$$U(\theta)_{H2}=U_1(\theta)_H+U_2(\theta)_H$$

$$=U(\square,\ b=N-0.5p)+U(\square,\ b=N+0.5p+b')$$

$$-\{U(\square,\ b=N-0.5p-b')+U(\square,\ b=N+0.5p)\}\ \%\ \cdots\cdots(3.36)$$

図－3.21(b)は同形の4個の光源が図－3.20(b)のように設けられた場合の分布図を示す。この場合，求めるべき$U(\theta)_{H4}$は式(3.36)の$U(\theta)_{H2}$に光源Ⅲ，Ⅳの効果$U_3(\theta)_H$，$U_4(\theta)_H$を加えたものであるから，

$$U(\theta)_{H4}=U(\square,\ b=N-0.5p)+U(\square,\ b=N+0.5p+b')+U(\square,\ b=N-1.5p-b')$$

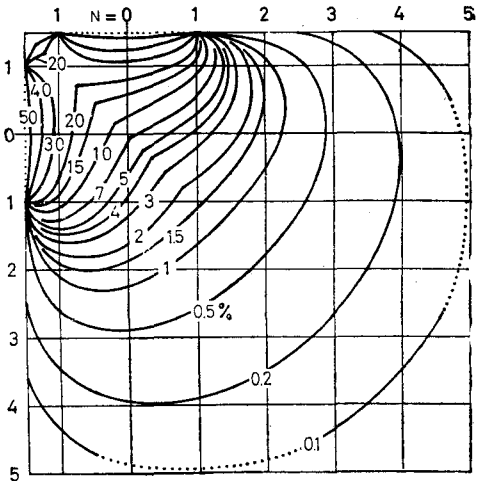
$$+U(\square,\ b=N+1.5p+2b')-\{U(\square,\ b=N-0.5p-b')+U(\square,\ b=N+0.5p)$$

$$+U(\square,\ b=N-1.5p-2b')+U(\square,\ b=N+1.5p+b')\}\ \%\ \cdots\cdots(3.37)$$

計算に当たって$U_H(\square,-x)=-U_H(\square,x)$として取扱うことは式(3.35)と同様である。

図－3.21(a)，(b)から開口数の増加とともに，室奥部では$U(\theta)_H$の一定の直接昼光率の分布線が後退するとともに，開口面に平行するように分布線が平坦化すること，すなわち，室幅方向の均斉度がよくなることが認められる。

図－3.22は図－3.14において，$l=1$，$b'=2$の開口が図の点線位置で示すように，互に直角に配置($h=0$)された場合の等$U(\theta)_H$線図である。この図の場合には，$U(\theta)_H$を合成するのに，これまでの例と異なって直交網目上に重ね合わせて各値を加えることが必要であるため，それぞれの光源に対する計算は式(3.35)によって，N，dの一定間隔毎に行わなければならない。この図の場合はN，dの間隔を0.5とした。また，この場合，光源配置は対角線に対して対称であるから，分布曲線もこれに関して対称形をなしている。

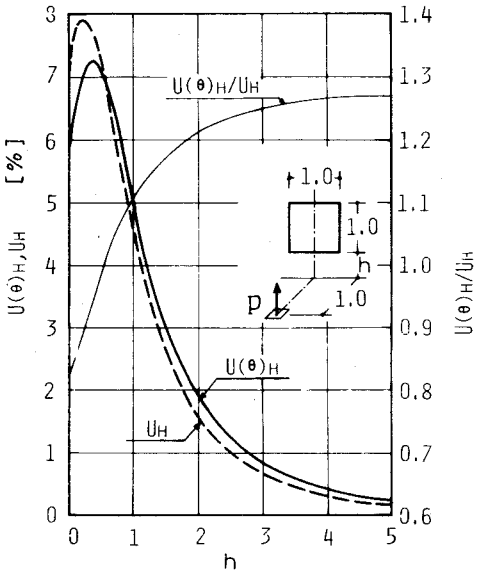


図－3.22　互に直角に配置された鉛直長方形光源による$U(\theta)_H$の分布

〔3〕 鉛直長方形光源（その3）

図－3.16 に見るように，光源下縁が受照面上にあるときは各点の $U(\theta)_H$ は均一輝度天空の場合の値 U_H より低い。しかし，光源下縁が受照面を離れて高くなるにつれて，窓際近くでは $U(\theta)_H > U_H$ となる部分があらわれる。このことは受照面上の $U(\theta)_H$ の均斉度が全体として下ることを意味し，却って不利であるといえる。

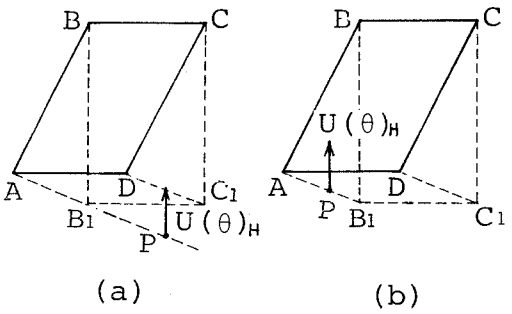
図－3.23 は図－3.14 において，$l=b'=1$ の正方形光源の下縁が受照面上 h（$h=0, 1, \cdots, 5$）となる場合，光源中央線上，光源から $d=1.0$ の距離にある点Pでの $U(\theta)_H$ を求めてプロットしたものである。この場合，光源下縁高がほぼ 0.5 を境として，h が大となれば，$U(\theta)_H$ が U_H よりも大ととなっていることが認められる。図中の細実線は両者の比較のために描いた $U(\theta)_H/U_H$ の値を示す。この曲線は $h \fallingdotseq 0.5$ で 1.0 となっている。



図－3.23 鉛直正方形光源による $U(\theta)_H$

〔4〕 傾斜した長方形光源

図－3.24(a)のような傾斜した長方形光源 $ABCD$ による P 点の $U(\theta)_H$ は，これまで誘導した各式のどれによっても求められない。この場合には，この $U(\theta)_H$ の等価値を与えるような数個の光源の合成効果として計算する。輝度 L_θ の分布が同一で，立体角もまた同一であることから，鉛直長方形の仮想光源 BCC_1B_1 による $U(\theta)_H$ の値 $U(\theta, BCC_1B_1)_H$ は光源 $ABCD$ と仮想光源 ABB_1, CC_1D, ADC_1B_1 による $U(\theta)_H$ の和であり，このうち，ABB_1, ADC_1B_1 による $U(\theta)_H$ は，P 点において $U(\theta)_H=0$ であるから，



図－3.24 傾斜した長方形光源

$$U(\theta, BCC_1B_1)_H = U(\theta, ABCD)_H + U(\theta, CC_1D)_H$$

従って求める$U(\theta, ABCD)_H$を$U(\theta)_H$と書くことにすると，

$$U(\theta)_H = U(\theta, BCC_1B_1)_H - U(\theta, CC_1D)_H \quad \% \cdots\cdots (3.38)$$

ただし，これはP点が図－3.24(a)に示すように，B_1より光源に対して外方にある場合で，内方にある場合は図－3.24(b)に見られるように，

$$U(\theta, BCC_1B_1)_H + U(\theta, CC_1D)_H + U(\theta)_H = 50 \quad \%$$

であるから，

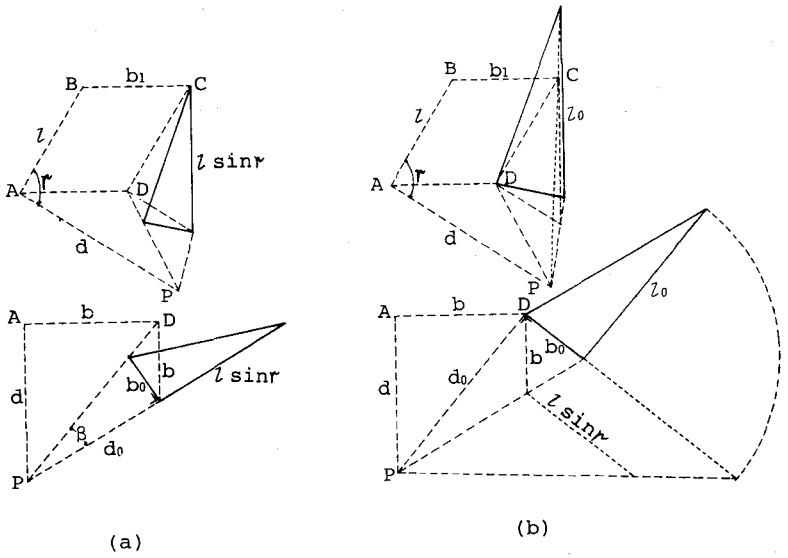
$$U(\theta)_H = 50 - \{U(\theta, BCC_1B_1)_H + U(\theta, CC_1D)_H\} \quad \% \cdots\cdots (3.39)$$

となり，PとB_1とが一致するときには，下記のようである。

$$U(\theta)_H = 25 - U(\theta, CC_1D)_H \quad \% \cdots\cdots (3.40)$$

式(3.38)～(3.40)の各式の計算において，$U(\theta, BCC_1B_1)_H$は鉛直長方形光源であるから，これによるP点の$U(\theta)_H$は式(3.3a)によるか，図－3.10から求めることができる。

また，CC_1Dは鉛直な直角三角形であるから，図－3.25のように，これと等価でしかも式(3.2a)または図－3.11の使用できる形を求めて計算することができる。



図－3.25　等価な直角三角形

図－3.25(a)において，式(3.2a)に代入すべきb，l，dの値はそれぞれ次のようである。これらのb_0，l_0，d_0を使用して$U(\theta)_H$を計算することができる。

$$\left.\begin{aligned} &b_0=d_0\tan\beta,\quad l_0=l\sin\gamma,\quad d_0=\sqrt{(d-l\cos\gamma)^2+b^2} \\ &\cos\beta=\frac{b^2+d^2-d\cdot l\cdot\cos\gamma}{\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{(d-l\cos\gamma)^2+b^2}} \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(a)}$$

また，図－3.25(b)については下記のようである。

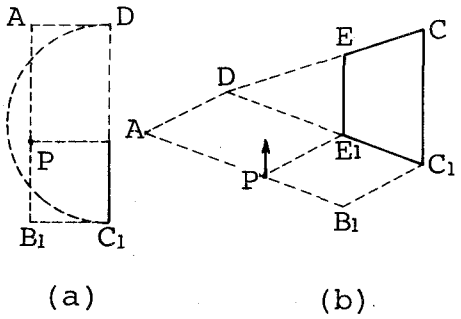
$$\left.\begin{aligned} &b_0=\sqrt{b^2+d^2}\tan\beta,\quad l_0=\frac{l(b^2+d^2)\sin\gamma}{b^2+d^2-d\cdot l\cdot\cos\gamma},\quad d_0=\sqrt{b^2+d^2} \\ &\cos\beta=\frac{b^2+d^2-d\cdot l\cdot\cos\gamma}{\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{(d-l\cos\gamma)^2+b^2}} \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(b)}$$

以上の式(a) (b)は図上で求める方が簡便であることが多い。

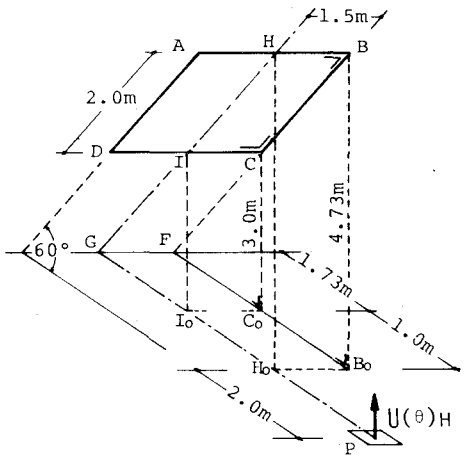
また，図－3.26(a)ように，C_1Dを直径とする円を描いた場合，計算点Pがその円の内部あるときには，前述のような等価な直角三角形を描くことはできない。このようなときには同図(b)のように，直角三角形CC_1Dを二つの部分に分け，台形EE_1C_1Cに対して式(3.3a)によるほかはない。

一例として，図－3.27のような水平面に対して60.°の傾斜をもつ長方形光源による窓中心線GH_0上の点の直接昼光率$U(\theta)_H$を求める。

図では対称性のために，求めるべき光源$ABCD$によるP点での$U(\theta)_H$の値は$IHBC$によるP点での$U(\theta)_H$の2倍である。これを$U(\theta, ABCD)_H$と書くことにすると，下記のようである。



図－3.26



図－3.27　傾斜した長方形光源

$$U(\theta, ABCD)_H = 2 \cdot U(\theta, IHBC)_H$$

$$U(\theta, IHBC)_H = U(\theta, GHBF)_H - U(\theta, GICF)_H$$

$$\therefore \quad U(\theta, ABCD)_H = 2\{U(\theta, GHBF)_H - U(\theta, GICF)_H\} \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(c)}$$

式(c)の｛ ｝内の各項は次のようになる。

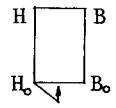
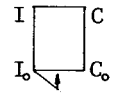
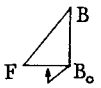
$$\left.\begin{aligned} U(\theta, GHBF)_H &= U(\theta, H_0HBB_0)_H - U(\theta, FBB_0)_H \\ U(\theta, GICF)_H &= U(\theta, I_0ICC_0)_H - U(\theta, FCC_0)_H \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(d)}$$

Pが$\overline{FC_0}$，$\overline{FB_0}$を直径とする円外にあることから，式(d)の第2項はそれぞれ等価な直角三角形を描くことによって，それらによるP点での$U(\theta)_H$を求めることができる。

$$U(\theta, ABCD)_H = 2\Big[\{U(\theta, H_0HBB_0)_H - U(\theta, I_0ICC_0)_H\} - \{U(\theta, FBB_0)_H - U(\theta, FCC_0)_H\}\Big] \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(e)}$$

式(e)の右辺各項を計算した結果を一括して表−3.5に示す。

表−3.5　$U(\theta)_H$の計算例

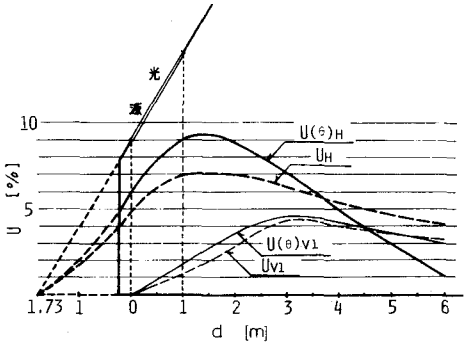
光源の形態	式　図表	寸　法	寸　法　比	U(θ)H
	式(3.28) 図−3.10	b = 1.50 m d = 2.00 m l = 4.73 m	b/d = 0.75 l/d = 2.37	8.1 %
	式(3.28) 図−3.10	b = 1.50 m d = 3.00 m l = 3.00 m	b/d = 0.50 l/d = 1.00	3.0 %
	式(3.29) 図−3.11	b_0 = 0.88 m d_0 = 2.50 m l_0 = 4.73 m	b_0/d_0 = 0.35 l_0/d_0 = 1.89	2.0 %
	式(3.29) 図−3.11	b_0 = 0.53 m d_0 = 3.35 m l_0 = 3.00 m	b_0/d_0 = 0.16 l_0/d_0 = 0.90	0.35 %

表−3.5の値を上式(e)に代入して，下記のように$U(\theta)_H$が得られる。

$$U(\theta, ABCB)_H = 2\{(8.1-3.0)-(2.0-0.35)\} \fallingdotseq 7.0\,\%$$

図－3.28 はこのような計算値をプロットして得た曲線で，図－3.27 のような傾斜した光源 $ABCD$ による GH_0 線上の直接昼光率値を示す。太実線は $U(\theta)_H$，太破線は均一天空輝度を仮定した場合の値 U_H である。図より開口部に近いところでは $U(\theta)_H > U_H$ となり，4 m 以上の室奥部では $U(\theta)_H < U_H$ となっている。

なお，同図には鉛直面に関する直接昼光率値 $U(\theta)_{V1}$, U_{V1} も描いてあるが，これらの算定については次節で述べる。



図－3.28 傾斜した長方形光源の中心線上の $U(\theta)_H$, $U(\theta)_{V1}$

3.6 鉛直面直接昼光率の計算図表と計算例 [7)]

3.6.1 鉛直面直接昼光率の計算図表

前節と同様に，鉛直面直接昼光率に関しても，その実用化のためには，適当な数表化または図表化が必要と考えられる。ここでは，鉛直面に関する計算図表と前節同様の開口に関する分布計算例とについて述べる。図表を作成した式は下記の(3.41)～(3.48)の各式で，これらはそれぞれ表－3.6 に示す場合の $U(\theta)_V$ に対応するものである。

$$U_{V_1}(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b\{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}-d^2\sqrt{b^2+d^2}\}}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$
$$\left.+6\left\{\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}+\frac{b}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}\right\}\right]\ \% \quad \cdots\cdots (3.41)$$

$$U_{V_2}(\square)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{d^2+l^2}(d+\sqrt{b^2+d^2+l^2})-d\sqrt{b^2+d^2+l^2}(\sqrt{b^2+d^2}+\sqrt{d^2+l^2})}{\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$
$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{l}{d}-\frac{d}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}\right\}\right]\%\quad \cdots\cdots (3.42)$$

$$U_{V_1}(\triangle)=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{bl^2\sqrt{b^2+d^2}(\sqrt{N^2+d^4}-d^2)}{N^2\sqrt{N^2+d^4}}+6\frac{bl}{N}\tan^{-1}\frac{N}{d^2}\right]\ \% \quad \cdots\cdots (3.43)$$

$$U_{V2}(\text{◺})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{N^2(\sqrt{b^2+d^2}-d)-b^2d(\sqrt{N^2+d^4}-d^2)}{N^2\sqrt{b^2+d^2}}-6\left\{\frac{dl}{N}\tan^{-1}\frac{N}{d^2}-\tan^{-1}\frac{l}{d}\right\}\right]\% \cdots (3.44)$$

ただし，$N^2=b^2d^2+d^2l^2+l^2b^2$

$$U_{V1}(\text{▭})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b\{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}-d^2\sqrt{b^2+d^2}\}}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{b}{d}-\frac{d}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\% \cdots\cdots (3.45)$$

$$U_{V2}(\text{▭})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l\{(d^2+b^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}-d^2\sqrt{d^2+l^2}\}}{(d^2+b^2)\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\tan^{-1}\frac{l}{d}-\frac{d}{\sqrt{b^2+d^2}}\tan^{-1}\frac{l}{\sqrt{b^2+d^2}}\right\}\right]\% \cdots\cdots (3.46)$$

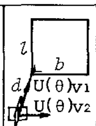
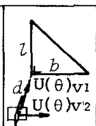
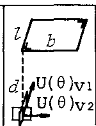
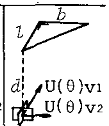
$$U_{V1}(\text{◹})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{bl^2}{(d^2+l^2)\sqrt{b^2+d^2+l^2}}\right.$$

$$\left.+6\left\{\frac{b}{\sqrt{b^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{\sqrt{b^2+l^2}}{d}-\frac{d}{\sqrt{d^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{d^2+l^2}}\right\}\right]\% \cdots\cdots (3.47)$$

$$U_{V2}(\text{◹})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l(\sqrt{b^2+d^2+l^2}-\sqrt{d^2+l^2})}{\sqrt{d^2+l^2}\sqrt{b^2+d^2+l^2}}+6\left\{\tan^{-1}\frac{l}{d}-\frac{l}{\sqrt{b^2+l^2}}\tan^{-1}\frac{\sqrt{b^2+l^2}}{d}\right\}\right]\% \cdots\cdots (3.48)$$

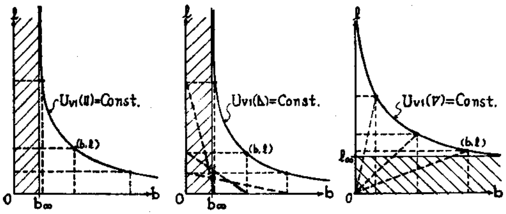
図表作成に当たっての両軸の目盛は，前節と同様に $y=\tan^{-1}x$ のスケールを利用し，d を単位として b，l を表わすことにすると，式(3.41)～(3.48)は，一般に，$U(\theta)_V=(100/28\cdot\pi)\cdot F(b,l)$ の形に書くことができ，一定の $U(\theta)_V$ の値に対して，この式を満足する(b，l)の組合わせを多数求めて，コントワラインを描くことになる。このような(b，l)の組合わせを求めることは，前回と同様に $28\pi\cdot U(\theta)_V/100=u$ とおき，

表－3.6　光源の形態と記号

形 態				
記 号	Uv1(□) Uv2(□)	Uv1(◺) Uv2(◺)	Uv1(▭) Uv2(▭)	Uv1(◹) Uv2(◹)
式	(3.41) (3.42)	(3.43) (3.44)	(3.45) (3.46)	(3.47) (3.48)
図	3.30 3.31	3.32 3.33	3.34 3.35	3.36 3.37

$$u-F(b,\ l)=0 \cdots\cdots (a)$$

において，uの一定値毎に一群のbを仮定して式(a)を解くことである。その際，手順として，図－3.29を考えておく必要がある。左の2図は$U(\theta)_{V1}$または$U(\theta)_{V2}$に関するもので，ある一定値uに対して，式(a)の解lはb_∞（$l\to\infty$のときのbの値）より小さいb値に対して存在しないことを示している。また右端の図においては，l_∞（$b\to\infty$のときのlの値）以下のlに対して組合わすべきbが存在しない。各図から，$b>b_\infty$の領域内でb_∞に近い所では求めるべき曲線の勾配が急であり，正確な曲線形を捉えるためにはbの間隔を小さくとることが必要である。



図－3.29

b_∞（またはl_∞）の値は式(3.41)～(3.48)において，l（またはb）$\to\infty$として得られる式(3.49)～(3.54)でdを単位として$U(\theta)_{V1}$, $U(\theta)_{V2}$の一定値毎に計算することができる。

$$U_{V1}(\text{▯})=U_{V1}(\text{◺})=\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{b_\infty}{\sqrt{b_\infty{}^2+d^2}}\ \% \quad\cdots\cdots\quad (3.49)$$

$$U_{V2}(\text{▯})=U_{V2}(\text{◺})=\frac{100}{28\pi}(8+3\pi)\frac{\sqrt{b_\infty{}^2+d^2}-d}{\sqrt{b_\infty{}^2+d^2}}\ \% \quad\cdots\cdots\quad (3.50)$$

$$U_{V1}(\text{▭})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b_\infty}{\sqrt{b_\infty{}^2+d^2}}+6\tan^{-1}\frac{b_\infty}{d}\right]\ \% \quad\cdots\cdots\quad (3.51)$$

$$U_{V2}(\text{▭})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{b_\infty{}^2}{b_\infty{}^2+d^2}+3\pi\frac{\sqrt{b_\infty{}^2+d^2}-d}{\sqrt{b_\infty{}^2+d^2}}\right]\ \% \quad\cdots\cdots\quad (3.52)$$

$$U_{V1}(\text{◥})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l_\infty{}^2}{d^2+l_\infty{}^2}+3\pi\frac{\sqrt{d^2+l_\infty{}^2}-d}{\sqrt{d^2+l_\infty{}^2}}\right]\ \% \quad\cdots\cdots\quad (3.53)$$

$$U_{V2}(\text{◥})=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{l_\infty}{\sqrt{d^2+l_\infty{}^2}}+6\tan^{-1}\frac{l_\infty}{d}\right]\ \% \quad\cdots\cdots\quad (3.54)$$

鉛直面に関する図表作成においては，b（またはl）を

$b=b_\infty+b_n$，　$b_n=0.05$，0.1…0.2，0.3…0.6，0.8，1.0，1.5，

2.0…3，4…6，8，10…20　（計24個）

または，$l = l_\infty + l_n$ ，l_n は b_n と同様とした。

式(a)の解 l（または b）を求める計算は出発値を 1 として，

$$l_{n+1} = l_n + H \ , \quad H = 1 \quad \cdots\cdots \text{(b)}$$

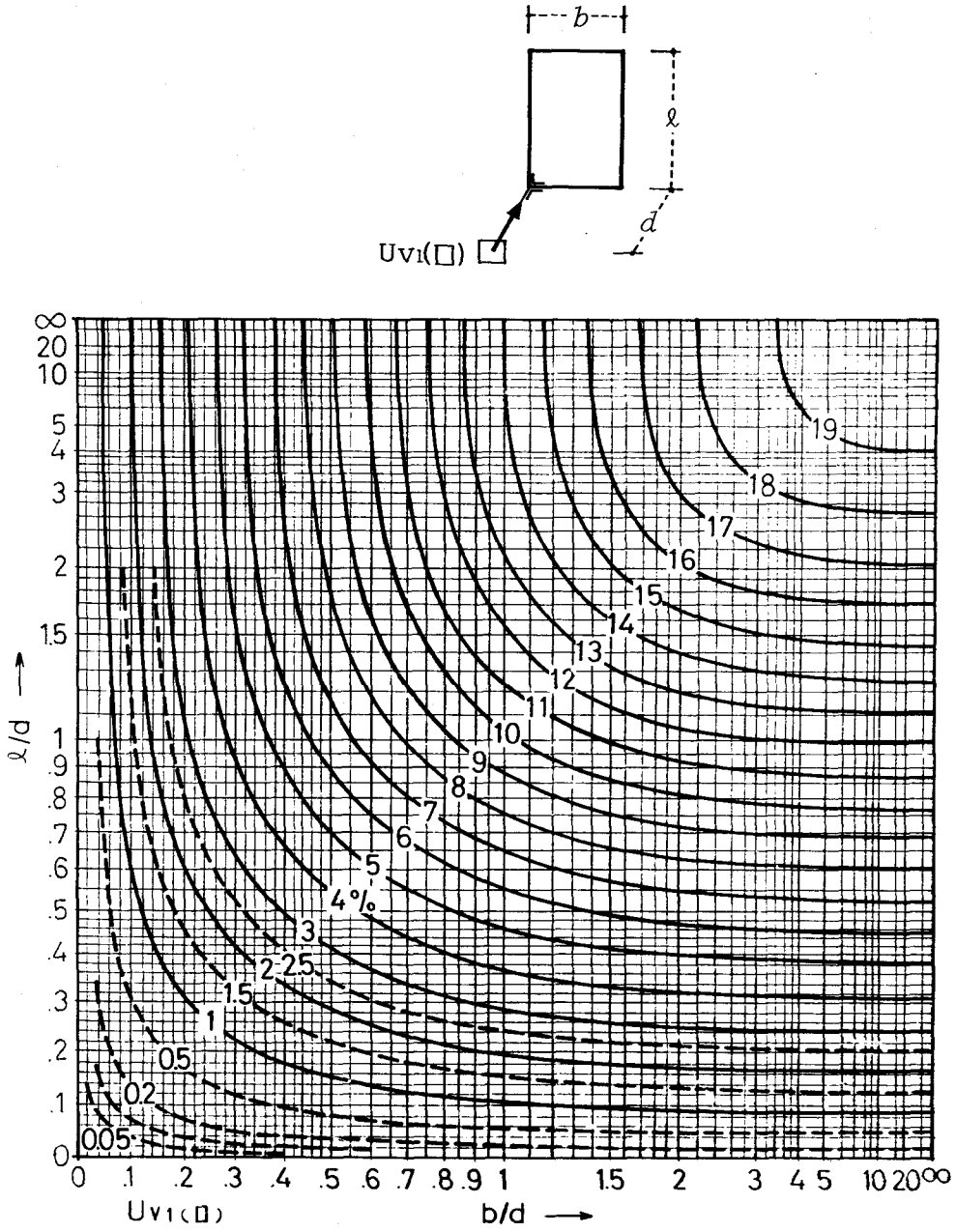
とし，これを式(a)の左辺に代入して，その値が正であれば，さらに式(b)による新しい値 l_{n+1} を式(a)の左辺に代入することを継続し，負であれば，$H = -(H/2)$ として式(b)を改めて l_{n+1} を定め計算を続行する。その経過において，式(a)の左辺の計算結果の絶対値が 10^{-6} より小となれば計算を停止して，最後の l_{n+1} を l（または b）の値として採用し，（b ，l_{n+1}）が求めるべき曲線上の 1 点であるものとした。

式(a)の u の値，式(3.49)～(3.54)における b_∞（または l_∞）の値は表－3.7 のようである。

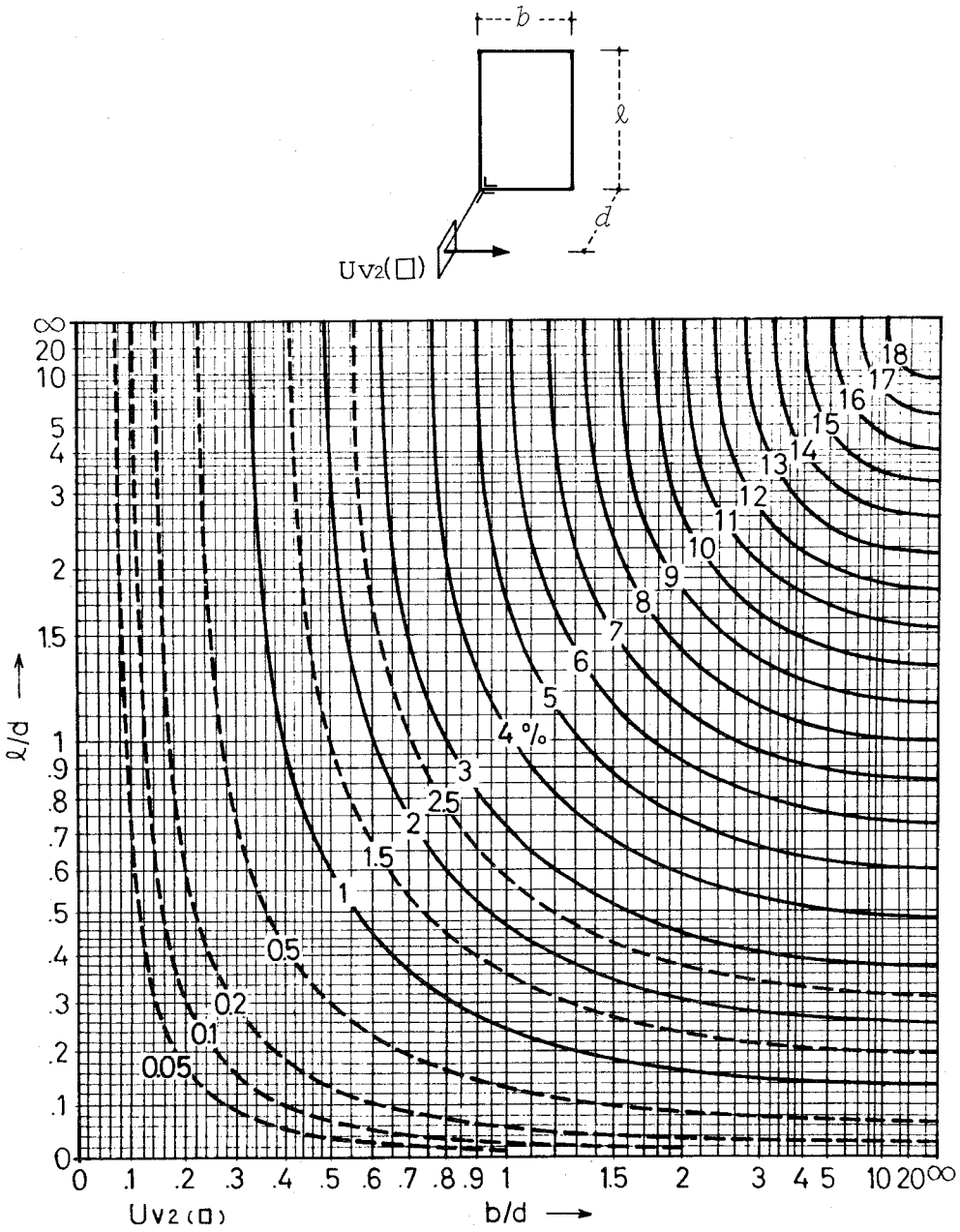
以上の手順に従って，式(3.41)～(3.48)を計算した結果をプロットしたのが，図－3.30～図－3.37 である。

表－3.7　$U(\theta)_V$ の各値に対する u，b_∞（l_∞）の値

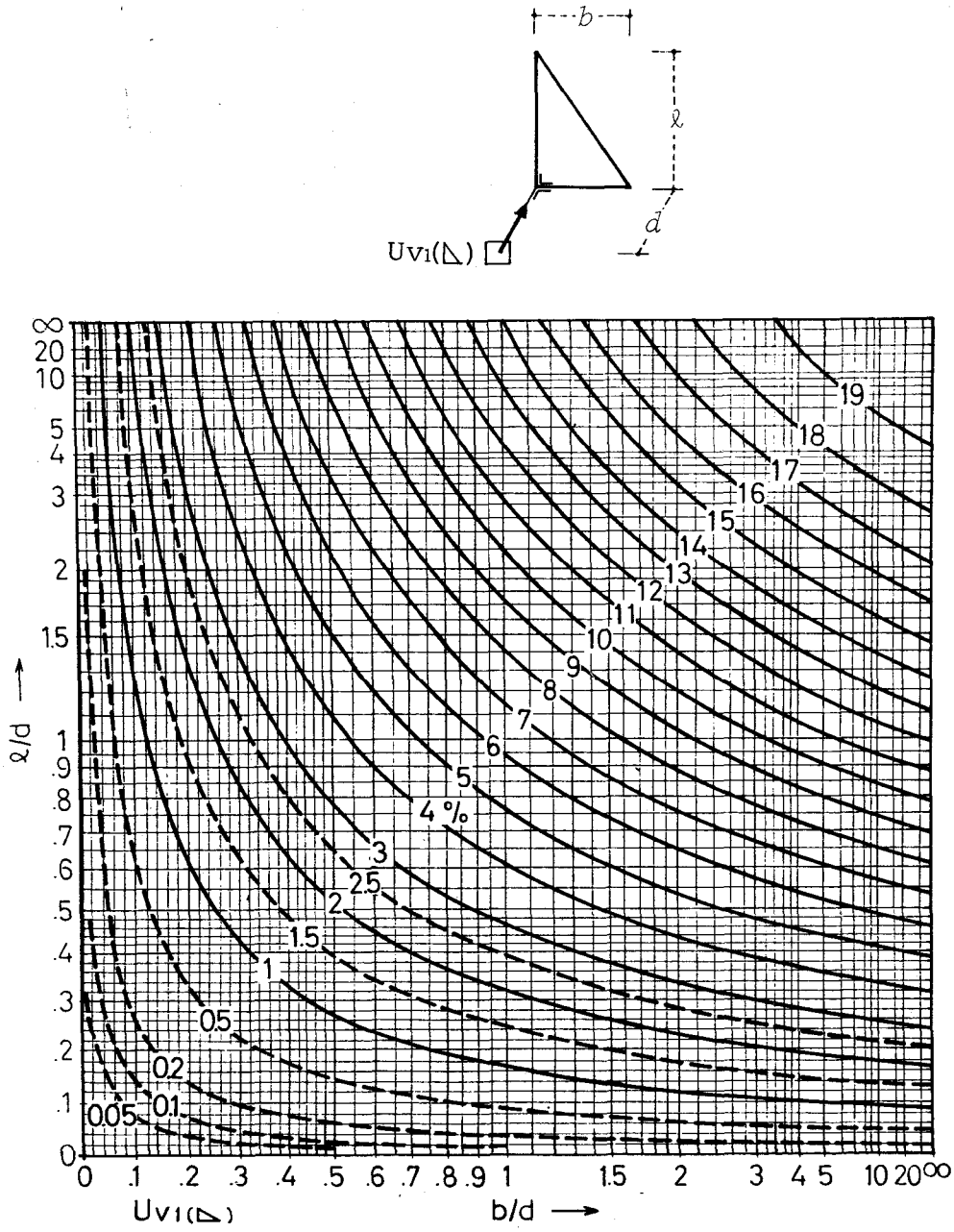
U(θ)V [%]	u	b_∞				l_∞	
		Uv1(□) Uv1(◺)	Uv2(□) Uv2(◺)	Uv1(▭)	Uv2(▭)	Uv1(◹)	Uv2(◹)
0.05	0.0440	0.0025	0.0712	0.0031	0.0589	0.0589	0.0031
0.10	0.0880	0.0050	0.1009	0.0063	0.0834	0.0834	0.0063
0.15	0.1319	0.0076	0.1238	0.0094	0.1024	0.1024	0.0094
0.20	0.1759	0.0101	0.1432	0.0126	0.1184	0.1184	0.0126
0.50	0.4398	0.0252	0.2290	0.0314	0.1890	0.1890	0.0314
1.00	0.8796	0.0505	0.3304	0.0629	0.2717	0.2717	0.0629
1.50	1.3195	0.0759	0.4130	0.0946	0.3384	0.3384	0.0946
2.00	1.7593	0.1015	0.4871	0.1265	0.3976	0.3976	0.1265
2.50	2.1991	0.1272	0.5565	0.1588	0.4527	0.4527	0.1588
3.00	2.6389	0.1532	0.6235	0.1914	0.5052	0.5052	0.1914
4.00	3.5186	0.2062	0.7550	0.2584	0.6066	0.6066	0.2584
5.00	4.3982	0.2609	0.8884	0.3283	0.7073	0.7073	0.3283
6.00	5.2779	0.3178	1.0285	0.4021	0.8109	0.8109	0.4021
7.00	6.1575	0.3777	1.1797	0.4810	0.9202	0.9202	0.4810
8.00	7.0372	0.4415	1.3468	0.5666	1.0383	1.0383	0.5666
9.00	7.9168	0.5100	1.5358	0.6611	1.1688	1.1688	0.6611
10.0	8.7965	0.5848	1.7545	0.7672	1.3164	1.3164	0.7672
11.0	9.6761	0.6677	2.0142	0.8891	1.4874	1.4874	0.8891
12.0	10.5558	0.7614	2.3313	1.0327	1.6913	1.6913	1.0327
13.0	11.4354	0.8698	2.7320	1.2073	1.9426	1.9426	1.2073
14.0	12.3150	0.9990	3.2602	1.4288	2.2658	2.2658	1.4288
15.0	13.1947	1.1594	3.9960	1.7254	2.7049	2.7049	1.7254
16.0	14.0743	1.3700	5.1037	2.1548	3.3499	3.3499	2.1548
17.0	14.9540	1.6719	6.9810	2.8554	4.4176	4.4176	2.8554
18.0	15.8336	2.1766	10.9053	4.2697	6.6010	6.6010	4.2697
19.0	16.7133	3.3912	24.4696	9.0163	14.0111	14.0111	9.0163



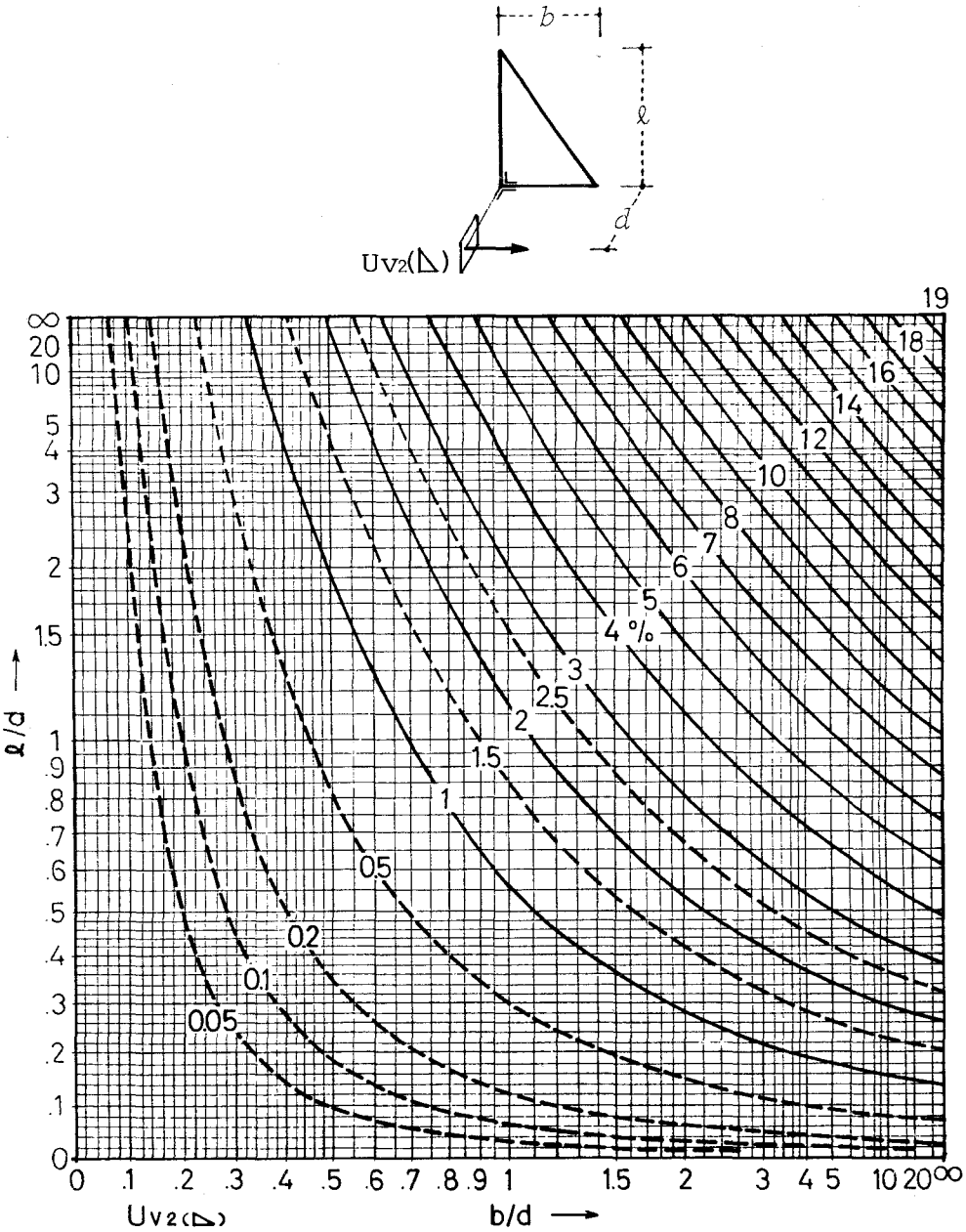
図－3.30　鉛直長方形光源による鉛直面直接昼光率算定図表　（受照面が光源面と平行の場合）



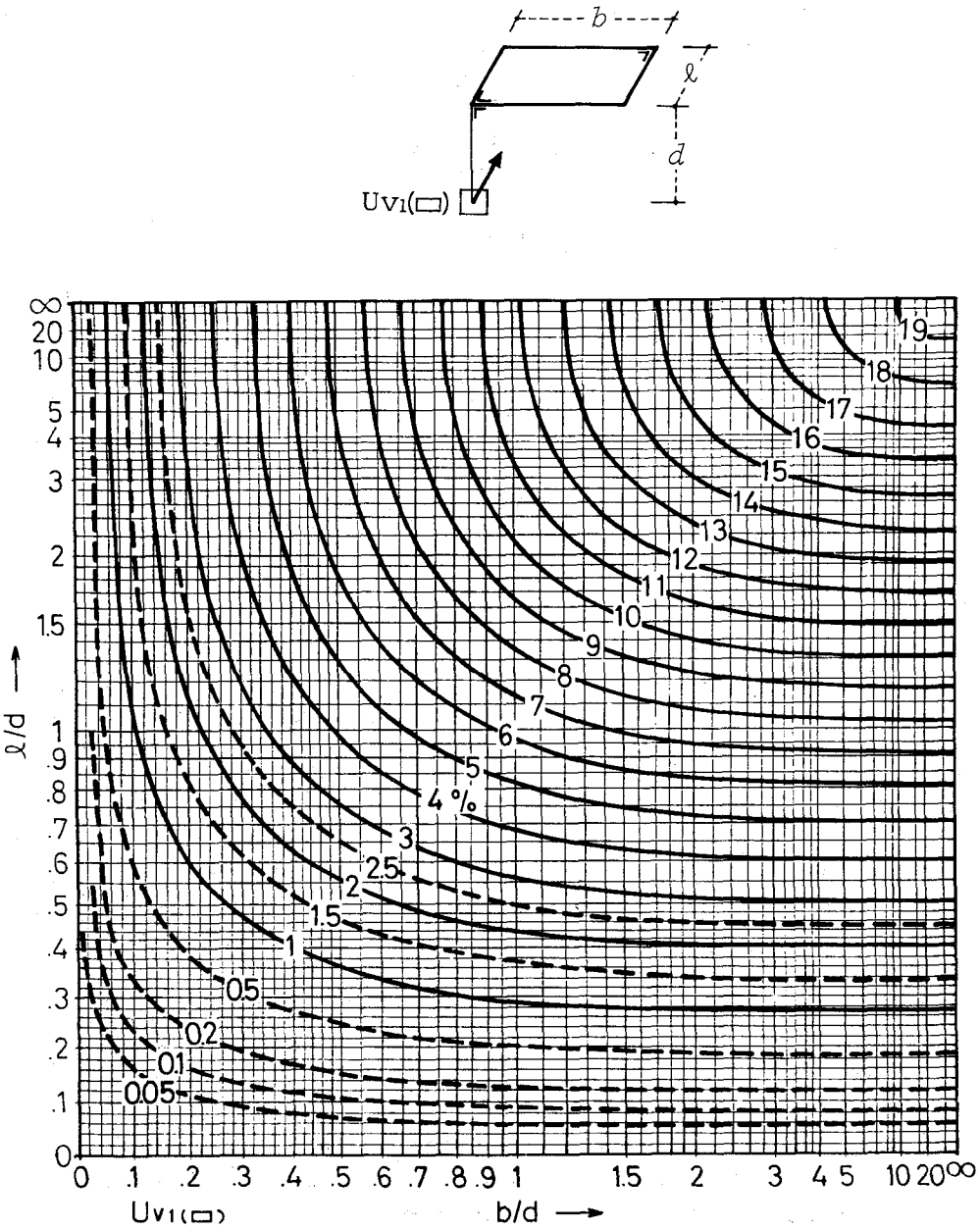
図－3.31　鉛直長方形光源による鉛直面直接昼光率
算定図表　（受照面が光源面と垂直の場合）



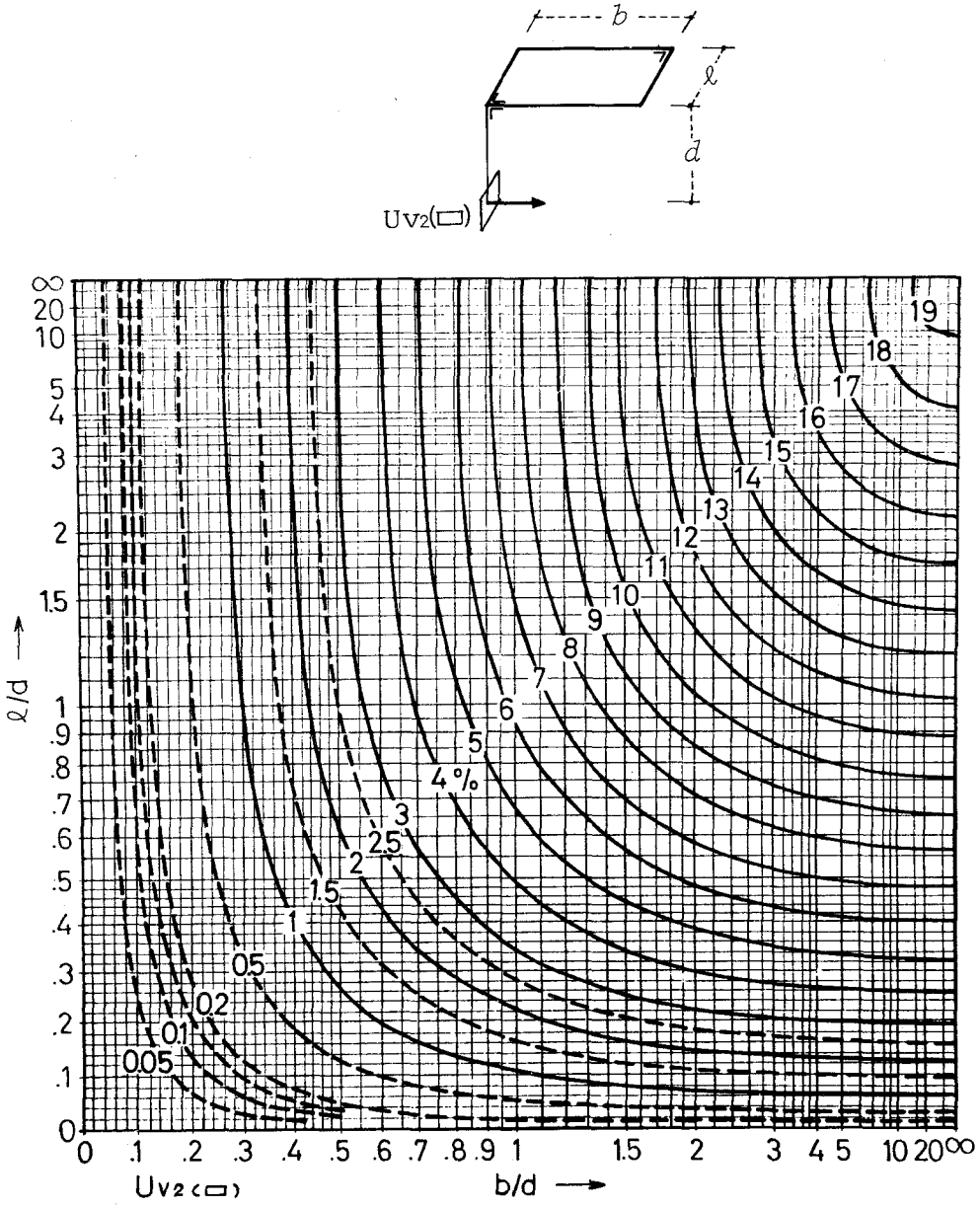
図－3.32　鉛直直角三角形光源による鉛直面直接昼光率
算定図表　（受照面が光源面と平行の場合）



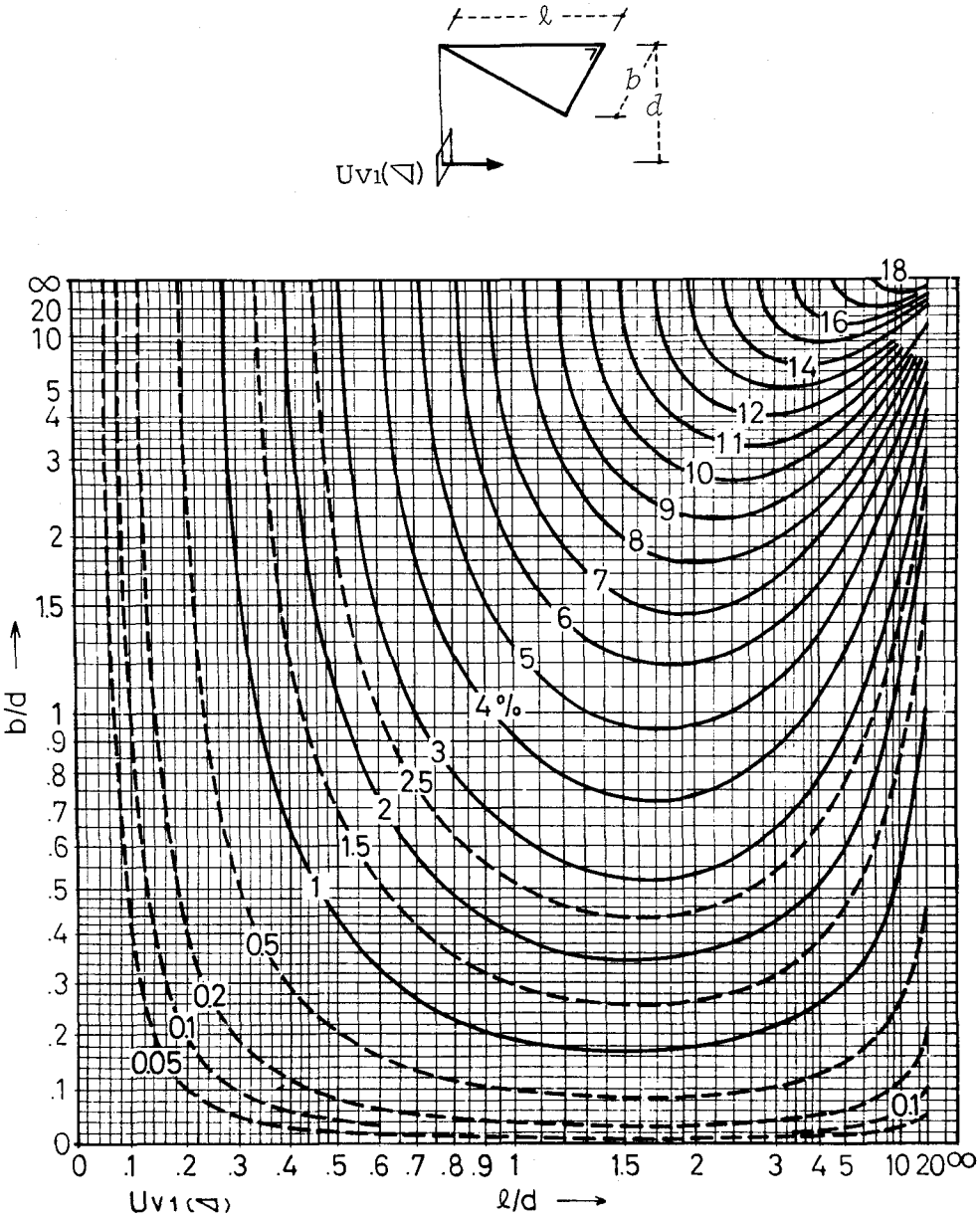
図－3.33　鉛直直角三角形光源による鉛直面直接昼光率
算定図表　（受照面が光源面と垂直の場合）



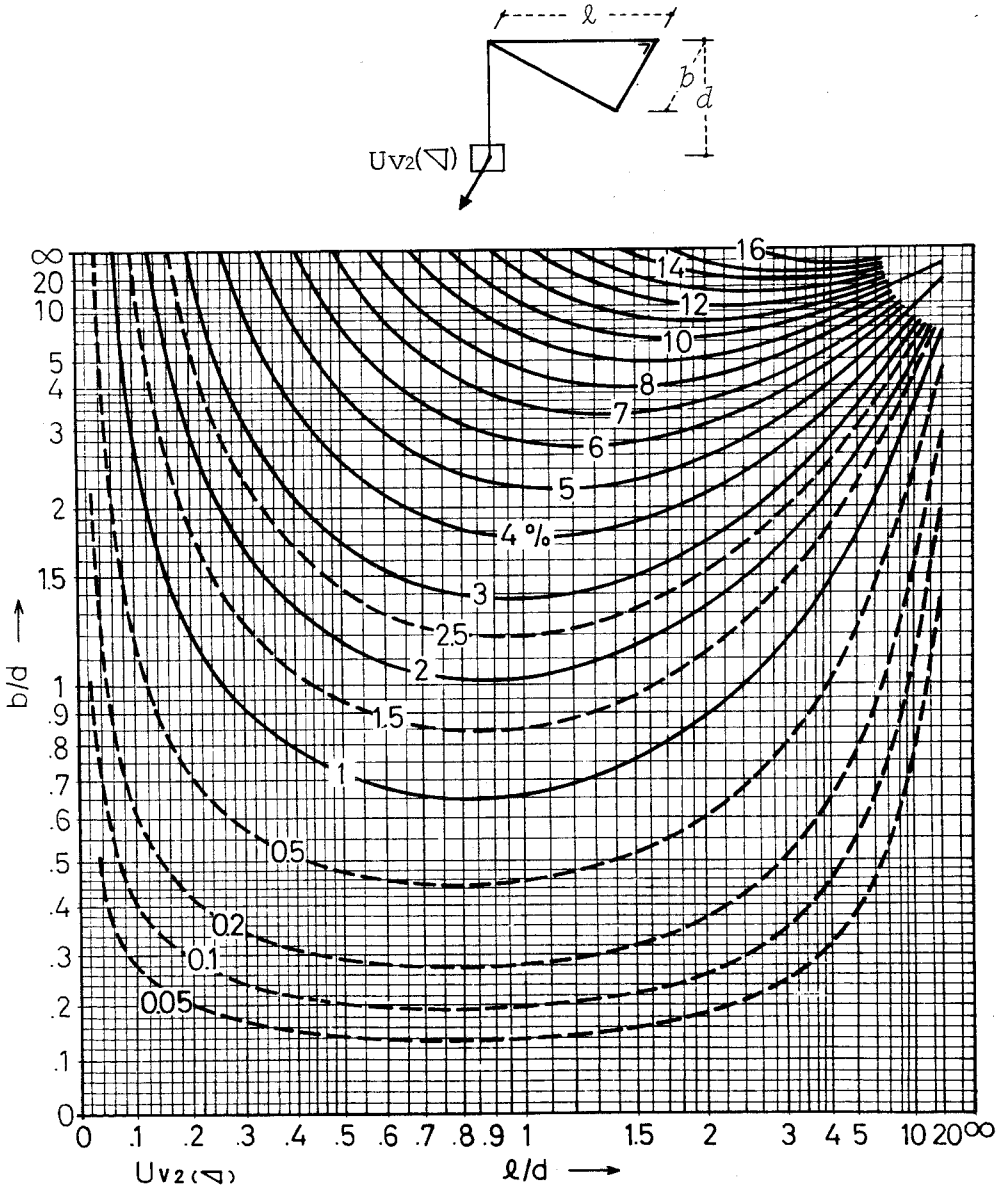
図－3.34　水平長方形光源による鉛直面直接昼光率算定図表



図－3.35　水平長方形光源による鉛直面直接昼光率算定図表



図－3.36　水平直角三角形光源による鉛直面直接昼光率算定図表



図－3.37　水平直角三角形光源による鉛直面直接昼光率算定図表

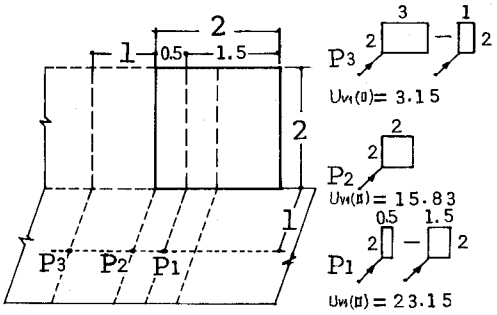
3.6.2 鉛直面直接昼光率の計算例

主として鉛直長方形光源に関する計算例を示す。

〔1〕 鉛直長方形光源（その1）

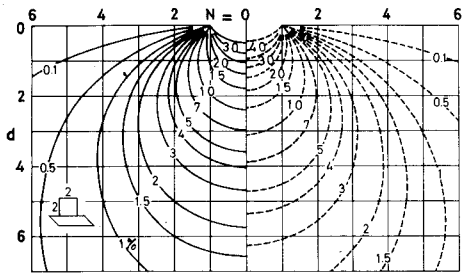
i) $U(\theta)_{V1}$ の分布例

図－3.38 の点 P_1，P_2，P_3 における U_{V1}(□) は図－3.30 を利用して，図の右側に示すように，（$b=1.5$，$l=2$），（$b=0.5$，$l=2$），（$b=3$，$l=2$），（$b=1$，$l=2$）の各光源にする U_{V1}(□) を求め，図示のようにそれらの代数和を計算して求めることができる。点線で受照面上に示した直線群が構成している他の格子点についても同様の手順によって，それぞれにおける U_{V1}(□) の値が求められる。これらの各点の U_{V1}(□) 値によって，U_{V1}(□) の等直接昼光率曲線を描くことができる。



図－3.38

図－3.39 は上記のようにして描いた等 U_{V1}(□) 線図である。図中の実曲線は U_{V1}(□) を示し，破曲線はそれと対照するために描いた均一輝度の場合である。両者の比較から分布の均斉度の点で前者の方がよくないことが認められる。

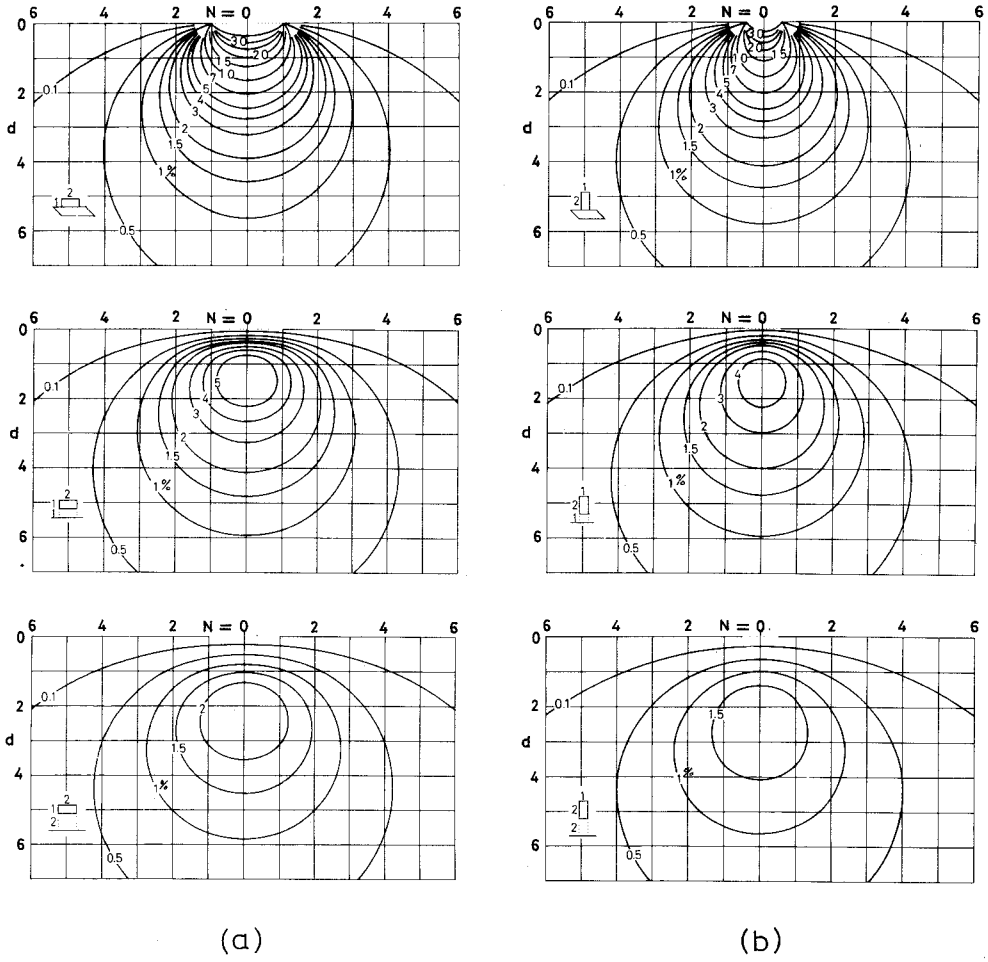


図－3.39 $U(\theta)_{V1}$ U_{V1} の分布例

図－3.40(a)，(b)はそれぞれ $l=1$，$b=2$ および $l=2$，$b=1$ の鉛直長方形光源に関する水平受照面内の U_{V1}(□) の分布例を示す。これらの図では U_H(□) の場合と類似の傾向が見られ，U_{V1}(□) の最大値は光源下端が受照面より高くなるにつれて小さくなり，室奥方向に移動することが認められる。

このような等 U_{V1}(□) 線図を正確に描く必要のある場合には，図－3.30 からの読取値では不十分なことが多く，図－3.38 の各格子点について必要範囲の計算表を用意することが必要となる。表－3.8 はこの場合に対して用意したもので，$l=2$，$l=3$ の値を示す。$l=1$ の場合は b，d の値をそれぞれ 2 倍して，$l=4$ の場合には 0.5 倍して $l=2$ に対す

る表の値を読めばよい。



図－3.40　U_{V1}(□)の分布例

表－3.8　U_{V1}(□ , l = const.)の値（%）

l=2.0

d \ b	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.1	19.4159	19.6952	19.7443	19.7596	19.7658	19.7687	19.7702	19.7711	19.7716	19.7719	19.7722	19.7723	19.7724	19.7725
0.2	18.3594	19.3635	19.5531	19.6133	19.6377	19.6492	19.6552	19.6587	19.6608	19.6621	19.6630	19.6636	19.6641	19.6644
0.3	16.9136	18.8392	19.2425	19.3739	19.4278	19.4534	19.4669	19.4746	19.4793	19.4823	19.4843	19.4857	19.4867	19.4874
0.4	15.3425	18.1586	18.8238	19.0481	19.1415	19.1862	19.2099	19.2235	19.2318	19.2371	19.2406	19.2430	19.2448	19.2461
0.5	13.8163	17.3628	18.3111	18.6443	18.7856	18.8539	18.8904	18.9113	18.9241	18.9323	18.9378	18.9416	18.9443	18.9463
0.6	12.4163	16.4920	17.7207	18.1726	18.3683	18.4640	18.5154	18.5451	18.5633	18.5750	18.5829	18.5883	18.5922	18.5950
0.7	11.1672	15.5812	17.0694	17.6437	17.8984	18.0246	18.0930	18.1327	18.1571	18.1728	18.1834	18.1907	18.1960	18.1998
0.8	10.0661	14.6590	16.3738	17.0690	17.3852	17.5443	17.6312	17.6820	17.7133	17.7336	17.7473	17.7568	17.7636	17.7686
0.9	9.0991	13.7472	15.6494	16.4595	16.8380	17.0314	17.1382	17.2010	17.2400	17.2653	17.2824	17.2942	17.3028	17.3090
1.0	8.2491	12.8615	14.9101	15.8257	16.2655	16.4941	16.6217	16.6972	16.7444	16.7752	16.7960	16.8105	16.8209	16.8286
1.2	6.8372	11.2063	13.4329	14.5232	15.0774	15.3759	15.5464	15.6492	15.7140	15.7567	15.7857	15.8060	15.8207	15.8315
1.4	5.7248	9.7359	12.0142	13.2258	13.8770	14.2411	14.4544	14.5853	14.6690	14.7245	14.7626	14.7895	14.8089	14.8233
1.6	4.8361	8.4565	10.6976	11.9796	12.7063	13.1282	13.3820	13.5407	13.6437	13.7128	13.7605	13.7944	13.8191	13.8374
1.8	4.1188	7.3563	9.5042	10.8134	11.5935	12.0634	12.3539	12.5392	12.6612	12.7440	12.8017	12.8430	12.8732	12.8957
2.0	3.5323	6.4165	8.4395	9.7425	10.5554	11.0628	11.3850	11.5948	11.7351	11.8314	11.8992	11.9481	11.9840	12.0110
2.2	3.0506	5.6160	7.4997	8.7723	9.6001	10.1346	10.4832	10.7147	10.8721	10.9815	11.0592	11.1157	11.1575	11.1890
2.4	2.6516	4.9346	6.6756	7.9015	8.7297	9.2816	9.6509	9.9013	10.0741	10.1958	10.2832	10.3472	10.3948	10.4309
2.6	2.3189	4.3539	5.9557	7.1247	7.9419	8.5029	8.8876	9.1536	9.3401	9.4732	9.5697	9.6410	9.6944	9.7351
2.8	2.0397	3.8580	5.3279	6.4347	7.2324	7.7953	8.1903	8.4687	8.6671	8.8105	8.9155	8.9937	9.0528	9.0981
3.0	1.8039	3.4333	4.7806	5.8230	6.5953	7.1541	7.5550	7.8429	8.0512	8.2036	8.3165	8.4013	8.4658	8.5155
3.2	1.6037	3.0682	4.3029	5.2812	6.0241	6.5743	6.9772	7.2717	7.4881	7.6483	7.7683	7.8592	7.9288	7.9828
3.4	1.4327	2.7533	3.8854	4.8013	5.5124	6.0504	6.4520	6.7507	6.9732	7.1401	7.2663	7.3628	7.4373	7.4954
3.6	1.2858	2.4806	3.5197	4.3759	5.0540	5.5772	5.9749	6.2753	6.5024	6.6747	6.8064	6.9079	6.9868	7.0488
3.8	1.1590	2.2434	3.1984	3.9983	4.6432	5.1497	5.5412	5.8416	6.0716	6.2482	6.3845	6.4904	6.5735	6.6391
4.0	1.0489	2.0363	2.9155	3.6625	4.2746	4.7632	5.1469	5.4454	5.6770	5.8568	5.9970	6.1068	6.1935	6.2625
4.2	0.9530	1.8547	2.6656	3.3634	3.9435	4.4135	4.7880	5.0834	5.3153	5.4973	5.6405	5.7537	5.8437	5.9158
4.4	0.8689	1.6950	2.4441	3.0962	3.6455	4.0967	4.4611	4.7521	4.9832	5.1666	5.3122	5.4282	5.5211	5.5959
4.6	0.7950	1.5538	2.2473	2.8571	3.3769	3.8093	4.1629	4.4486	4.6781	4.8619	5.0092	5.1275	5.2229	5.3002
4.8	0.7297	1.4287	2.0718	2.6426	3.1344	3.5483	3.8906	4.1703	4.3974	4.5810	4.7293	4.8494	4.9470	5.0265
5.0	0.6717	1.3173	1.9149	2.4497	2.9150	3.3107	3.6415	3.9148	4.1387	4.3214	4.4704	4.5918	4.6911	4.7725
5.5	0.5529	1.0877	1.5890	2.0457	2.4513	2.8042	3.1063	3.3617	3.5757	3.7541	3.9023	4.0253	4.1274	4.2124
6.0	0.4620	0.9113	1.3366	1.7293	2.0841	2.3985	2.6730	2.9097	3.1119	3.2836	3.4288	3.5512	3.6544	3.7414
6.5	0.3913	0.7733	1.1378	1.4781	1.7896	2.0701	2.3189	2.5371	2.7268	2.8904	3.0309	3.1511	3.2539	3.3416
7.0	0.3353	0.6636	0.9789	1.2759	1.5508	1.8015	2.0270	2.2276	2.4045	2.5593	2.6941	2.8110	2.9121	2.9995
7.5	0.2902	0.5752	0.8502	1.1112	1.3550	1.5797	1.7842	1.9684	2.1328	2.2786	2.4071	2.5199	2.6186	2.7048

表-3.8 （つづき）

l=3.0

d \ b	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.1	19.4217	19.7057	19.7582	19.7756	19.7832	19.7869	19.7890	19.7902	19.7910	19.7915	19.7918	19.7920	19.7922	19.7923
0.2	18.3821	19.4051	19.6079	19.6767	19.7065	19.7215	19.7297	19.7345	19.7376	19.7395	19.7409	19.7418	19.7425	19.7430
0.3	16.9638	18.9307	19.3635	19.5141	19.5801	19.6133	19.6316	19.6424	19.6492	19.6536	19.6566	19.6587	19.6602	19.6613
0.4	15.4292	18.3169	19.0333	19.2911	19.4057	19.4637	19.4959	19.5149	19.5269	19.5347	19.5400	19.5437	19.5464	19.5483
0.5	13.9469	17.6017	18.6277	19.0120	19.1858	19.2746	19.3241	19.3535	19.3720	19.3841	19.3923	19.3981	19.4022	19.4053
0.6	12.5963	16.8218	18.1586	18.6820	18.9234	19.0481	19.1181	19.1599	19.1862	19.2035	19.2153	19.2235	19.2294	19.2338
0.7	11.4001	16.0087	17.6383	18.3069	18.6222	18.7870	18.8802	18.9362	18.9715	18.9948	19.0106	19.0217	19.0297	19.0356
0.8	10.3536	15.1876	17.0790	17.8929	18.2859	18.4941	18.6128	18.6845	18.7300	18.7600	18.7805	18.7949	18.8052	18.8129
0.9	9.4408	14.3772	16.4920	17.4462	17.9186	18.1726	18.3187	18.4075	18.4640	18.5015	18.5271	18.5451	18.5581	18.5678
1.0	8.6433	13.5900	15.8873	16.9730	17.5245	17.8257	18.0006	18.1076	18.1761	18.2216	18.2528	18.2748	18.2907	18.3025
1.2	7.3265	12.1150	14.6590	15.9707	16.6729	17.0690	17.3040	17.4499	17.5443	17.6074	17.6510	17.6820	17.7044	17.7211
1.4	6.2906	10.7922	13.4485	14.9291	15.7635	16.2504	16.5460	16.7326	16.8546	16.9371	16.9944	17.0352	17.0650	17.0872
1.6	5.4575	9.6224	12.2908	13.8832	14.8257	15.3945	15.7484	15.9756	16.1262	16.2288	16.3008	16.3523	16.3901	16.4183
1.8	4.7746	8.5942	11.2063	12.8598	13.8840	14.5232	14.9306	15.1970	15.3759	15.4992	15.5863	15.6492	15.6954	15.7302
2.0	4.2060	7.6925	10.2047	11.8777	12.9581	13.6545	14.1092	14.4122	14.6186	14.7624	14.8648	14.9392	14.9944	15.0359
2.2	3.7265	6.9018	9.2886	10.9491	12.0629	12.8030	13.2980	13.6339	13.8661	14.0298	14.1474	14.2335	14.2977	14.3463
2.4	3.3183	6.2077	8.4565	10.0809	11.2085	11.9796	12.5074	12.8722	13.1282	13.3106	13.4430	13.5407	13.6140	13.6697
2.6	2.9678	5.5976	7.7042	9.2763	10.4016	11.1921	11.7452	12.1346	12.4118	12.6118	12.7583	12.8672	12.9494	13.0124
2.8	2.6649	5.0604	7.0263	8.5353	9.6458	10.4454	11.0170	11.4265	11.7222	11.9381	12.0978	12.2176	12.3085	12.3786
3.0	2.4017	4.5865	6.4165	7.8562	8.9423	9.7425	10.3261	10.7513	11.0628	11.2929	11.4649	11.5948	11.6942	11.7712
3.2	2.1720	4.1676	5.8686	7.2359	8.2908	9.0845	9.6744	10.1112	10.4357	10.6783	10.8613	11.0007	11.1082	11.1918
3.4	1.9706	3.7965	5.3766	6.6708	7.6896	8.4712	9.0624	9.5071	9.8419	10.0951	10.2880	10.4362	10.5512	10.6412
3.6	1.7933	3.4671	4.9346	6.1568	7.1364	7.9015	8.4898	8.9391	9.2816	9.5436	9.7452	9.9013	10.0233	10.1194
3.8	1.6368	3.1740	4.5373	5.6896	6.6284	7.3736	7.9557	8.4064	8.7544	9.0235	9.2325	9.3957	9.5241	9.6259
4.0	1.4981	2.9127	4.1799	5.2652	6.1624	6.8855	7.4584	7.9080	8.2594	8.5339	8.7491	8.9185	9.0527	9.1598
4.2	1.3747	2.6792	3.8580	4.8795	5.7354	6.4347	6.9963	7.4425	7.7953	8.0737	8.2940	8.4687	8.6082	8.7201
4.4	1.2648	2.4700	3.5677	4.5290	5.3442	6.0187	6.5672	7.0083	7.3608	7.6418	7.8659	8.0452	8.1893	8.3055
4.6	1.1665	2.2821	3.3055	4.2101	4.9857	5.6350	6.1692	6.6036	6.9543	7.2365	7.4636	7.6467	7.7947	7.9149
4.8	1.0784	2.1131	3.0682	3.9198	4.6572	5.2812	5.8001	6.2266	6.5743	6.8566	7.0857	7.2717	7.4231	7.5468
5.0	0.9991	1.9607	2.8532	3.6552	4.3560	4.9549	5.4580	5.8755	6.2191	6.5006	6.7308	6.9191	7.0733	7.2000
5.5	0.8332	1.6400	2.3978	3.0899	3.7066	4.2451	4.7076	5.0999	5.4298	5.7056	5.9353	6.1263	6.2853	6.4178
6.0	0.7033	1.3876	2.0363	2.6364	3.1797	3.6625	4.0851	4.4504	4.7632	5.0294	5.2549	5.4454	5.6063	5.7420
6.5	0.6001	1.1863	1.7460	2.2693	2.7492	3.1820	3.5667	3.9047	4.1989	4.4532	4.6719	4.8593	5.0196	5.1566
7.0	0.5171	1.0237	1.5105	1.9694	2.3948	2.7830	3.1328	3.4445	3.7195	3.9606	4.1708	4.3532	4.5112	4.6477
7.5	0.4495	0.8910	1.3173	1.7221	2.1006	2.4497	2.7677	3.0545	3.3107	3.5381	3.7386	3.9148	4.0690	4.2038

表－3.9　Uv_2(□ , l = const.)の値（%）

l=2.0

d \ b	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.1	15.9037	17.7652	18.3522	18.6138	18.7505	18.8295	18.8786	18.9109	18.9332	18.9490	18.9607	18.9696	18.9764	18.9818
0.2	12.4117	15.7802	16.9152	17.4292	17.6997	17.8565	17.9542	18.0185	18.0628	18.0945	18.1178	18.1355	18.1491	18.1599
0.3	9.5578	13.9044	15.5164	16.2653	16.6636	16.8958	17.0410	17.1368	17.2029	17.2502	17.2851	17.3115	17.3319	17.3480
0.4	7.3569	12.1749	14.1718	15.1312	15.6490	15.9533	16.1443	16.2708	16.3582	16.4209	16.4672	16.5022	16.5294	16.5508
0.5	5.7078	10.6128	12.8945	14.0353	14.6620	15.0339	15.2688	15.4249	15.5332	15.6109	15.6683	15.7119	15.7457	15.7724
0.6	4.4823	9.2255	11.6944	12.9843	13.7080	14.1423	14.4186	14.6031	14.7315	14.8238	14.8922	14.9442	14.9845	15.0163
0.7	3.5675	8.0089	10.5776	11.9838	12.7912	13.2823	13.5972	13.8086	13.9562	14.0627	14.1418	14.2019	14.2486	14.2855
0.8	2.8775	6.9517	9.5471	11.0377	11.9152	12.4567	12.8072	13.0439	13.2098	13.3300	13.4193	13.4874	13.5404	13.5823
0.9	2.3498	6.0388	8.6034	10.1485	11.0825	11.6679	12.0506	12.3109	12.4942	12.6273	12.7267	12.8025	12.8616	12.9084
1.0	1.9406	5.2535	7.7444	9.3175	10.2946	10.9174	11.3289	11.6108	11.8104	11.9560	12.0648	12.1481	12.2131	12.2647
1.2	1.3626	4.0009	6.2653	7.8290	8.8558	9.5338	9.9925	10.3118	10.5405	10.7087	10.8354	10.9327	11.0090	11.0697
1.4	0.9882	3.0779	5.0702	6.5620	7.5970	8.3061	8.7981	9.1468	9.3998	9.5877	9.7301	9.8403	9.9270	9.9962
1.6	0.7356	2.3940	4.1136	5.4968	6.5082	7.2275	7.7399	8.1101	8.3825	8.5869	8.7431	8.8647	8.9609	9.0380
1.8	0.5596	1.8830	3.3514	4.6087	5.5745	6.2870	6.8084	7.1927	7.4796	7.6974	7.8653	7.9969	8.1015	8.1858
2.0	0.4336	1.4976	2.7447	3.8723	4.7787	5.4715	5.9922	6.3837	6.6807	6.9087	7.0863	7.2264	7.3385	7.4292
2.2	0.3414	1.2037	2.2611	3.2634	4.1031	4.7669	5.2790	5.6720	5.9749	6.2103	6.3954	6.5426	6.6611	6.7575
2.4	0.2726	0.9774	1.8745	2.7603	3.5310	4.1596	4.6571	5.0467	5.3517	5.5918	5.7825	5.9354	6.0592	6.1606
2.6	0.2204	0.8012	1.5640	2.3445	3.0468	3.6368	4.1153	4.4974	4.8013	5.0437	5.2381	5.3953	5.5236	5.6291
2.8	0.1803	0.6628	1.3134	2.0001	2.6370	3.1869	3.6433	4.0148	4.3150	4.5574	4.7540	4.9142	5.0459	5.1549
3.0	0.1490	0.5529	1.1101	1.7140	2.2899	2.7996	3.2320	3.5906	3.8848	4.1255	4.3226	4.4847	4.6189	4.7306
3.2	0.1243	0.4650	0.9440	1.4757	1.9952	2.4658	2.8734	3.2174	3.5039	3.7411	3.9375	4.1005	4.2363	4.3501
3.4	0.1046	0.3940	0.8076	1.2764	1.7446	2.1778	2.5603	2.8886	3.1660	3.3986	3.5931	3.7559	3.8925	4.0078
3.6	0.0887	0.3361	0.6949	1.1090	1.5309	1.9289	2.2866	2.5986	2.8659	3.0928	3.2844	3.4462	3.5830	3.6991
3.8	0.0758	0.2887	0.6012	0.9678	1.3481	1.7132	2.0469	2.3425	2.5990	2.8193	3.0072	3.1672	3.3036	3.4200
4.0	0.0652	0.2494	0.5229	0.8483	1.1912	1.5259	1.8367	2.1158	2.3612	2.5743	2.7578	2.9155	3.0508	3.1670
4.2	0.0565	0.2168	0.4570	0.7466	1.0562	1.3630	1.6519	1.9149	2.1490	2.3544	2.5331	2.6878	2.8216	2.9372
4.4	0.0492	0.1894	0.4013	0.6597	0.9397	1.2208	1.4891	1.7365	1.9593	2.1568	2.3302	2.4816	2.6134	2.7280
4.6	0.0430	0.1663	0.3540	0.5852	0.8387	1.0964	1.3455	1.5779	1.7895	1.9789	2.1467	2.2944	2.4238	2.5371
4.8	0.0379	0.1467	0.3136	0.5210	0.7509	0.9873	1.2185	1.4366	1.6372	1.8185	1.9805	2.1242	2.2510	2.3627
5.0	0.0335	0.1300	0.2789	0.4655	0.6743	0.8914	1.1059	1.3104	1.5004	1.6737	1.8298	1.9692	2.0931	2.2029
5.5	0.0251	0.0978	0.2114	0.3564	0.5219	0.6980	0.8761	1.0499	1.2150	1.3688	1.5100	1.6384	1.7544	1.8586
6.0	0.0192	0.0752	0.1636	0.2779	0.4107	0.5545	0.7029	0.8506	0.9936	1.1294	1.2562	1.3734	1.4807	1.5785
6.5	0.0150	0.0590	0.1290	0.2204	0.3281	0.4465	0.5707	0.6964	0.8202	0.9396	1.0530	1.1592	1.2579	1.3490
7.0	0.0120	0.0471	0.1033	0.1774	0.2656	0.3640	0.4685	0.5758	0.6831	0.7880	0.8890	0.9849	1.0752	1.1594
7.5	0.0097	0.0381	0.0839	0.1447	0.2177	0.3000	0.3885	0.4805	0.5736	0.6658	0.7556	0.8420	0.9242	1.0017

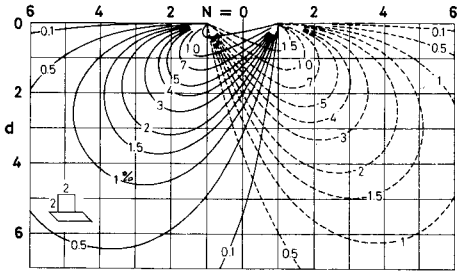
表-3.9 （つづき）

$l=3.0$

d \ b	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.1	15.9178	17.8144	18.4427	18.7420	18.9092	19.0115	19.0781	19.1235	19.1556	19.1790	19.1965	19.2099	19.2204	19.2286
0.2	12.4397	15.8774	17.0943	17.6831	18.0141	18.2173	18.3498	18.4402	18.5042	18.5509	18.5858	18.6126	18.6334	18.6500
0.3	9.5989	14.0474	15.7802	16.6399	17.1280	17.4292	17.6263	17.7610	17.8565	17.9262	17.9785	18.0185	18.0497	18.0745
0.4	7.4102	12.3604	14.5150	15.6194	16.2552	16.6504	16.9100	17.0879	17.2143	17.3067	17.3760	17.4292	17.4707	17.5036
0.5	5.7721	10.8370	13.3103	14.6282	15.3997	15.8835	16.2030	16.4229	16.5794	16.6940	16.7801	16.8461	16.8978	16.9388
0.6	4.5561	9.4837	12.1749	13.6715	14.5650	15.1312	15.5076	15.7676	15.9533	16.0895	16.1920	16.2708	16.3324	16.3814
0.7	3.6494	8.2962	11.1142	12.7538	13.7543	14.3959	14.8255	15.1238	15.3375	15.4948	15.6132	15.7044	15.7758	15.8326
0.8	2.9659	7.2631	10.1310	11.8786	12.9702	13.6797	14.1586	14.4930	14.7334	14.9109	15.0449	15.1482	15.2291	15.2937
0.9	2.4433	6.3692	9.2255	11.0482	12.2150	12.9843	13.5084	13.8765	14.1423	14.3392	14.4881	14.6031	14.6935	14.7655
1.0	2.0377	5.5980	8.3960	10.2640	11.4904	12.3115	12.8762	13.2755	13.5653	13.7805	13.9439	14.0703	14.1697	14.2491
1.2	1.4632	4.3604	6.9517	8.8353	10.1375	11.0377	11.6702	12.1240	12.4567	12.7059	12.8961	13.0439	13.1606	13.2541
1.4	1.0880	3.4373	5.7637	7.5888	8.9162	9.8650	10.5471	11.0444	11.4135	11.6922	11.9065	12.0738	12.2065	12.3132
1.6	0.8316	2.7424	4.7927	6.5126	7.8253	8.7958	9.5103	10.0404	10.4387	10.7426	10.9779	11.1628	11.3101	11.4290
1.8	0.6498	2.2131	4.0009	5.5904	6.8592	7.8290	8.5604	9.1129	9.5338	9.8583	10.1115	10.3118	10.4722	10.6022
2.0	0.5170	1.8048	3.3551	4.8040	6.0096	6.9608	7.6959	8.2614	8.6983	9.0388	9.3070	9.5205	9.6925	9.8325
2.2	0.4175	1.4860	2.8270	4.1357	5.2662	6.1857	6.9133	7.4835	7.9305	8.2828	8.5628	8.7874	8.9693	9.1182
2.4	0.3415	1.2343	2.3940	3.5686	4.6183	5.4968	6.2081	6.7759	7.2275	7.5877	7.8766	8.1101	8.3005	8.4570
2.6	0.2824	1.0335	2.0374	3.0875	4.0551	4.8866	5.5750	6.1344	6.5860	6.9503	7.2454	7.4859	7.6831	7.8462
2.8	0.2357	0.8718	1.7425	2.6791	3.5662	4.3476	5.0082	5.5546	6.0020	6.3673	6.6661	6.9115	7.1142	7.2827
3.0	0.1985	0.7405	1.4976	2.3321	3.1422	3.8723	4.5019	5.0316	5.4715	5.8349	6.1351	6.3837	6.5904	6.7633
3.2	0.1685	0.6329	1.2931	2.0365	2.7745	3.4536	4.0503	4.5606	4.9903	5.3494	5.6490	5.8991	6.1086	6.2848
3.4	0.1440	0.5442	1.1217	1.7844	2.4554	3.0849	3.6480	4.1369	4.5543	4.9071	5.2043	5.4545	5.6655	5.8440
3.6	0.1238	0.4705	0.9774	1.5686	2.1782	2.7603	3.2897	3.7562	4.1596	4.5045	4.7977	5.0467	5.2581	5.4381
3.8	0.1071	0.4089	0.8552	1.3835	1.9371	2.4744	2.9706	3.4141	3.8024	4.1380	4.4261	4.6726	4.8835	5.0641
4.0	0.0932	0.3572	0.7514	1.2242	1.7270	2.2224	2.6865	3.1069	3.4792	3.8046	4.0864	4.3295	4.5389	4.7194
4.2	0.0815	0.3134	0.6628	1.0868	1.5437	2.0001	2.4334	2.8308	3.1869	3.5012	3.7759	4.0148	4.2220	4.4016
4.4	0.0716	0.2762	0.5868	0.9678	1.3833	1.8036	2.2076	2.5826	2.9223	3.2251	3.4921	3.7260	3.9303	4.1085
4.6	0.0632	0.2444	0.5215	0.8645	1.2427	1.6298	2.0062	2.3595	2.6828	2.9737	3.2325	3.4609	3.6617	3.8379
4.8	0.0560	0.2171	0.4650	0.7745	1.1192	1.4757	1.8262	2.1586	2.4658	2.7448	2.9949	3.2174	3.4143	3.5880
5.0	0.0498	0.1936	0.4160	0.6959	1.0104	1.3390	1.6652	1.9777	2.2692	2.5362	2.7775	2.9936	3.1862	3.3571
5.5	0.0378	0.1475	0.3193	0.5389	0.7906	1.0593	1.3320	1.5991	1.8535	2.0913	2.3102	2.5097	2.6901	2.8525
6.0	0.0292	0.1146	0.2494	0.4241	0.6274	0.8483	1.0768	1.3047	1.5259	1.7364	1.9334	2.1158	2.2831	2.4357
6.5	0.0230	0.0905	0.1980	0.3386	0.5044	0.6872	0.8793	1.0740	1.2661	1.4517	1.6281	1.7937	1.9477	2.0898
7.0	0.0184	0.0726	0.1594	0.2739	0.4105	0.5628	0.7250	0.8917	1.0585	1.2219	1.3793	1.5290	1.6699	1.8015
7.5	0.0150	0.0591	0.1300	0.2243	0.3377	0.4655	0.6032	0.7464	0.8914	1.0352	1.1755	1.3104	1.4388	1.5600

ii) U_{V2}(□)の分布例

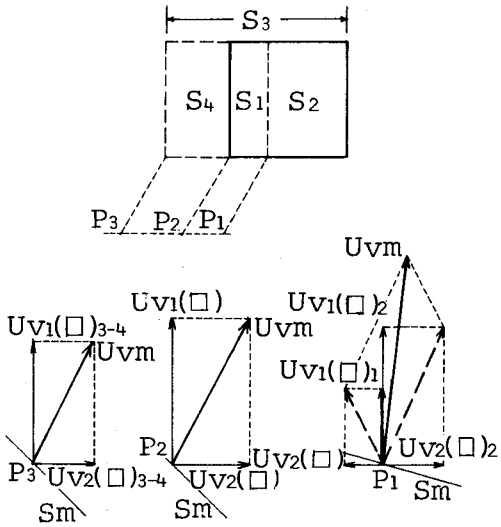
図－3.38の点P_1，P_2，P_3におけるU_{V2}(□)の値を求める場合には，受照面が光源面に向って左右のいずれを向いているかによってU_{V2}(□)は異なる。右方に向いて場合の値はそれぞれ，($b=1.5$, $l=2$)；($b=2$, $l=2$)；($b=3$, $l=2$)の値と($b=1$, $l=2$)の値の差などを図－3.31から求めることによって得られる。左方を向いている場合には，点P_2，P_3に対してU_{V2}(□)$=0$，点P_1に関しては($b=0.5$, $l=2$)に対する曲線図－3.38の読みによってU_{V2}(□)が求められる。図－3.41は受照面が光源面に対して右方を向いている場合の等U_{V2}(□)線図である。図中の実曲線がそれを示し，破曲線はこれと対照するために描き加えた均一輝度に対するものである。便宜上，左方を向く受照面における分布曲線を示した。表－3.9はこの場合に関する表－3.8と同様のU_{V2}(□)の数値表である。



図－3.41　$U(\theta)_{V2}$，U_{V2}の分布例

iii) 最大鉛直面直接昼光率U_{Vm}(□)の分布例

図－3.42の点P_1，P_2，P_3において，U_{Vm}(□)は図－3.42の光源部分名S_1～S_4を記号の右端に付記して表わすことにすれば，



図－3.42

P_2：　$U_{Vm}(\square)=[(U_{V1}(\square_{1+2}))^2+(U_{V2}(\square_{1+2}))^2]^{1/2}$ …… (a)

ただし，$U_{V1,2}(\square_{1+2})$は光源部分S_1+S_2によるU_{V1}(□)またはU_{V2}(□)を表わすものとする。

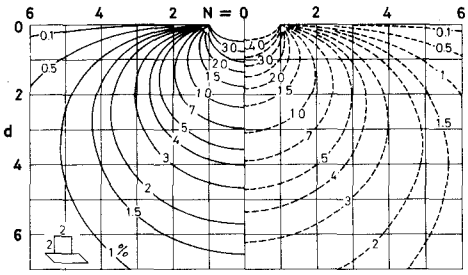
$$P_3: \quad \left.\begin{aligned} U_{Vm}(\square) &= [(U_{V1}(\square)_{3-4})^2 + (U_{V2}(\square)_{3-4})^2]^{1/2}, \\ U_{V1,2}(\square)_{3-4} &= U_{V1,2}(\square)_3 - U_{V1,2}(\square)_4 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (b)$$

また，P_1 では $U_{V1}(\square)_1$ と $U_{V2}(\square)_1$；$U_{V1}(\square)_2$ と $U_{V2}(\square)_2$ のベクトル和をそれぞれ，$U_V(\square)_1$，$U_V(\square)_2$ と書くことにすると，$U_{Vm}(\square)$ は $U_V(\square)_1$ と $U_V(\square)_2$ のベクトル和であり，計算の結果は下記のようになる。

$$P_1: \quad U_{Vm}(\square) = [(U_{V1}(\square)_1 + U_{V1}(\square)_2)^2 + (U_{V2}(\square)_1 - U_{V2}(\square)_2)^2]^{1/2} \cdots\cdots\cdots\cdots (c)$$

図－3.42 の S_m と注記した直線は最大値 $U_{Vm}(\square)$ が生じる受照面の位置を示す。

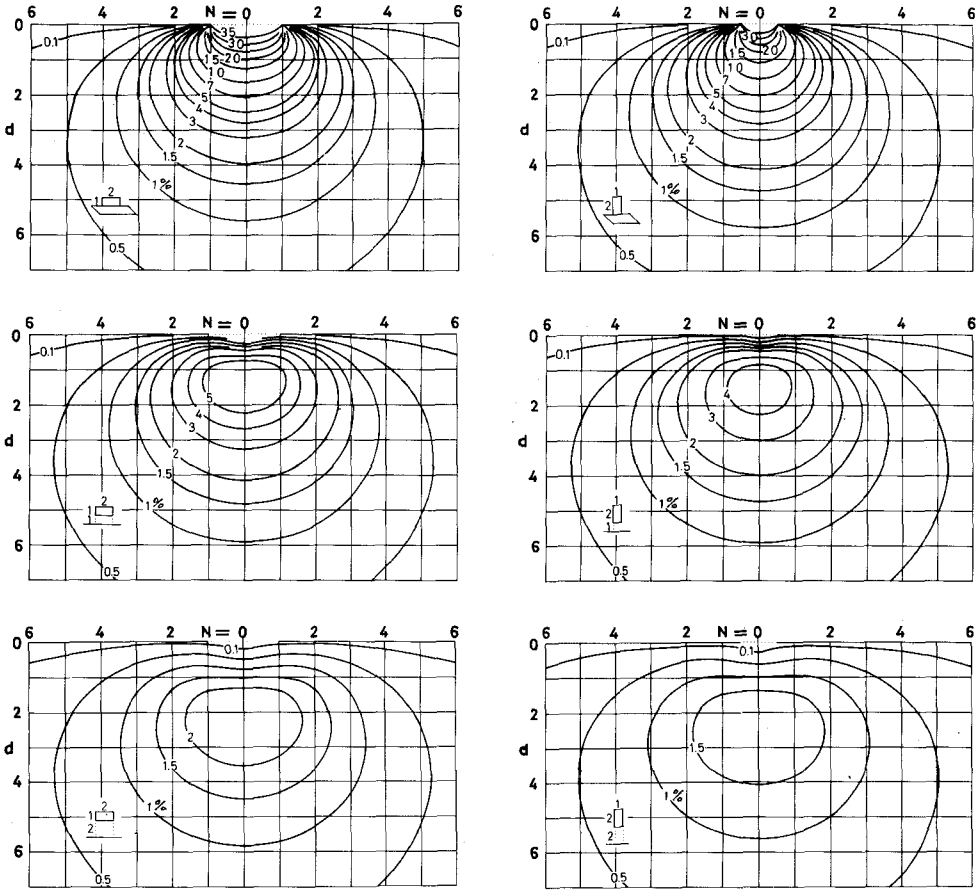
以上の式(a)～(c)を用い，図－3.30 及び図－3.32 または表－3.8 及び表－3.9 の値を使用して $U_{Vm}(\square)$ を計算し，その結果から等 $U_{Vm}(\square)$ 線図を描くことができる。



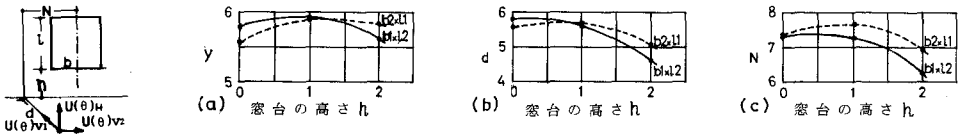
図－3.43　$U_{Vm}(\square)$ の分布例

図－3.43 は $b=2$，$l=2$ の場合の U_{Vm} の分布例を示す。図－3.40 と同様に実曲線は $U_{Vm}(\square)$ を示し，破曲線は均一輝度の場合における分布を示す。

図－3.44 は図－3.40 と同様の光源について描いた等 $U_{Vm}(\square)$ 線図であり，それらの図の傾向は $U_{V1}(\square)$ に関する場合に類似している。



図－3.44　U_{Vm}(□)の分布図



(a)　1％点の窓からの最大距離，y

(b)　1％点となる部分の最大長，d

(c)　1％点となる部分の最大幅，N

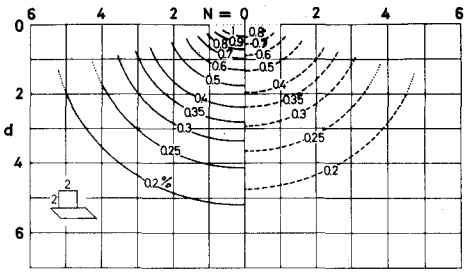
図－3.45

図－3.45 は以上の各図から，h の変化による傾向を，試みに U_{Vm}(□)＝1％線を例として示したものである。

iv) U_H(□)／U_{Vm}(□)の値の分布例

U_H(□)／U_{Vm}(□)の値は主光線の方向を示す指標と考えることができるであろう。この値が甚しく小さいことは直接光による照明効果が受照面に対して極めて低い高度をもって入射する場合に似ていることを示すものであり，その反対の場合は鉛直に近い方向から入射する場合の効果に近いであろう。このような極端な場合は当然よい照明効果は得られない。

図－3.46 は $b=2$，$l=2$ の開口に関する U_H(□)／U_{Vm}(□)の値のコントワライン図である。破曲線は均一輝度の場合を示す。室奥部に向って急速な数値の低下が見られる。

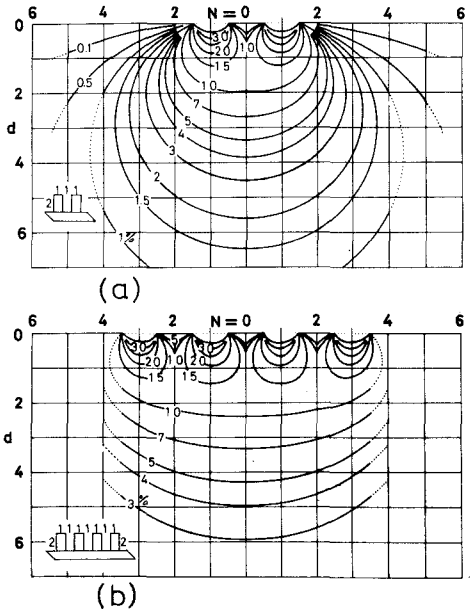


図－3.46　U_H(□)／U_{Vm}(□)の分布例

〔2〕 鉛直長方形光源（その2）

図－3.47 は図－3.20 と同一の形（$b=1$，$l=2$）をもつ採光面が間隔 $p=1$ で，2個及び4個併置された場合の $U(\theta)_{V1}$ の分布図である。この場合も水平面に関する直接昼光率 $U(\theta)_H$ と同様な関係式が成り立つ。すなわち，図－3.47(a)，(b)については，それぞれ式(3.36)，式(3.37)に準じて求めることができる。

図－3.47(a)，(b)から，開口数が増加するとともに，$U(\theta)_{V1}$ の一定パーセントの分布線が室奥部まで後退し，開口面に平行になるように平坦化していく傾向がみられる。

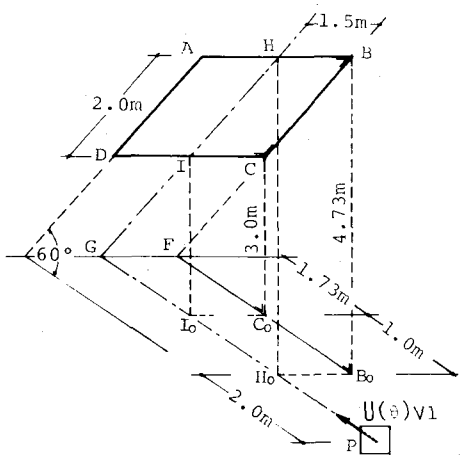


図－3.47　複数の長方形光源による $U(\theta)_{V1}$ の分布

〔3〕 傾斜した長方形光源

図－3.48 の点Pにおける$\overline{GF}$に平行な鉛直面に関する直接昼光率$U(\theta)_{V1}$は水平面に関する直接昼光率$U(\theta)_H$とほぼ同様にして求めることができる。同図を参照して

$$U(\theta, ABCD)_{V1}=2\{U(\theta,GHBF)_{V1}-U(\theta, GICF)_{V1}\}\cdots\cdots(a)$$



図－3.48 傾斜した長方形光源

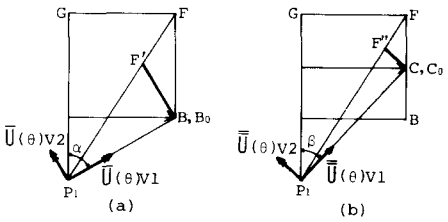
式(a)の｛ ｝内の各項は次のようになる。

$$\left.\begin{aligned}U(\theta,GHBF)_{V1}&=U(\theta, H_0HBB_0)_{V1}-U(\theta, FBB_0)_V\\U(\theta,GICF)_{V1}&=U(\theta, I_0ICC_0)_{V1}-U(\theta,FCC_0)_V\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(b)$$

この場合も，$U(\theta,FBB_0)_V$, $U(\theta,FCC_0)_V$は本文の諸式によって直接求めることはできない。

図－3.49(a)において，$U(\theta)_H$の場合と同様の等価な直角三角形$F'BB_0$を考えれば，

$b=\overline{B_0F'}$, $d=\overline{P_1B_0}$, $l=\overline{BB_0}$として，式(3.43)により図中の$\overline{U}(\theta)_{V1}$が，式(3.44)より$\overline{U}(\theta)_{V2}$が求められる。従って，$U(\theta,FBB_0)_V$は次のようになる。



図－3.49

$$U(\theta,FBB_0)_V=\overline{U}(\theta)_{V1}\cdot\cos\alpha+\overline{U}(\theta)_{V2}\cdot\sin\alpha\cdots\cdots\cdots\cdots(c)$$

$U(\theta,FCC_0)_V$についても同様で，図－3.48(b)を参照して，次のように書くことができる。

$$U(\theta,FCC_0)_V=\overline{\overline{U}}(\theta)_{V1}\cdot\cos\beta+\overline{\overline{U}}(\theta)_{V2}\cdot\sin\beta\cdots\cdots\cdots\cdots(d)$$

以上を総合して

$$U(\theta,ABCD)_{V1}=2\cdot\left[\{U(\theta, H_0HBB_0)_{V1}-\overline{U}(\theta)_{V1}\cdot\cos\alpha-\overline{U}(\theta)_{V2}\cdot\sin\alpha-\{U(\theta, I_0ICC_0)_{V1}-\overline{\overline{U}}(\theta)_{V1}\cdot\cos\beta-\overline{\overline{U}}(\theta)_{V2}\cdot\sin\beta\}\right]\ \%\cdots\cdots(e)$$

図－3.48，図－3.49から，$\cos\alpha=8.000$，$\sin\alpha=0.600$，$\cos\beta=0.894$，$\sin\beta=0.447$，であるから，それぞれの式の計算結果を一括して表－3.10に示す。

表－3.10　$U(\theta)_{V1}$ の計算例

	式　図表	寸 法 比	$U(\theta)_{V1}$	備　考
$U(\theta, H_0HBB_0)_{V1}$	式(3.41) 図-3.31	$b/d = 0.75$ $l/d = 2.37$	11.3 %	
$U(\theta, I_0ICC_0)_{V1}$	式(3.41) 図-3.31	$b/d = 0.50$ $l/d = 1.00$	6.5 %	
$U(\theta, FBB_0)_V$ $\bar{U}(\theta)_{V1}$	式(3.43) 図-3.33	$b/d = 0.35$	3.6 %	$\bar{U}(\theta)_{V1}=4.1\%$
$U(\theta, FBB_0)_V$ $\bar{U}(\theta)_{V2}$	式(3.44) 図-3.34	$l/d = 1.89$		$\bar{U}(\theta)_{V2}=0.6\%$
$U(\theta, FCC_0)_V$ $\bar{\bar{U}}(\theta)_{V1}$	式(3.43) 図-3.33	$b/d = 0.16$	1.1 %	$\bar{\bar{U}}(\theta)_{V1}=1.2\%$
$U(\theta, FCC_0)_V$ $\bar{\bar{U}}(\theta)_{V2}$	式(3.44) 図-3.34	$l/d = 0.90$		$\bar{\bar{U}}(\theta)_{V2}=0.07\%$

故に，PG に鉛直な鉛直面に関しては，次のようになる。

$$U(\theta, ABCD)_{V1} = 2\cdot\left[\left\{U(\theta, H_0BB_0)_{V1} - U(\theta, I_0ICC_0)_{V1}\right\} - \left\{U(\theta, FBB_0)_V - U(\theta, FCC_0)_V\right\}\right]$$

$$= 2\left\{(11.3 - 6.5) - (3.6 - 1.1)\right\} = 4.6\ \%$$

このようにして計算した結果をプロットしたのを図－3.28 に示す。$U(\theta)_{V1}$ も開口部に近いところでは $U(\theta)_{V1} > U_{V1}$ となり，5 m 以上の室奥部ではこの逆の傾向を示している。

3.7　第 3 章のまとめ

前章で誘導した鉛直な台形光源による直接昼光率の算定式に基づいて，光源寸法に若干の操作を加えて直角三角形，長方形などの直線形態の光源に対する直接昼光率が求められることを記述した。また，水平な直角三角形光源による同様の式を求め，これを基本形として，水平な長方形光源による直接昼光率の計算式を導いた。さらに，これらの利用の簡便化のために，水平面および鉛直面に関する計算図表を作成した。特に利用頻度の高い鉛直長方形光源に関してその利用例について述べ，均一輝度天空の場合と比較検討した。

参考文献

1)　小島武男・比嘉俊太郎・鵜飼正保・西安男：標準曇天空に関する鉛直面天空率，日本建築学会論文報告集　号外，昭和41年10月

2)　小島武男・比嘉俊太郎・鵜飼正保・西安男：標準曇天空に関する鉛直面天空率（そ

の２），日本建築学会東海支部研究報告集，第４号，昭和41年11月

3) 小島武男・比嘉俊太郎・鵜飼正保・西安男：ＣＩＥ標準曇天光による直接照度の計算式，日本建築学会論文報告集，第141号，昭和42年11月

4) 小島武男・比嘉俊太郎・岡本俊二：鉛直長方形光源による直接昼光率の計算図と水平面上の分布の計算例（CIE標準曇天空光による），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和43年10月

5) 小島武男・比嘉俊太郎・岡本俊二：鉛直直角三角形による直接昼光率の計算図表（CIE標準曇天空光による），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和44年８月

6) 小島武男・比嘉俊太郎・鵜飼正保・西安男：ＣＩＥ標準曇天光による直接照度の計算図表――その１　水平面照度に関する図表――，日本建築学会論文報告集，第160号，昭和44年６月

7) 小島武男・比嘉俊太郎・西安男・岡本俊二：ＣＩＥ標準曇天光による直接照度の計算図表――その２　鉛直面照度に関する図表――，日本建築学会論文報告集，第178号，昭和45年12月

4. 円形光源による直接昼光率

4.1 概　　説

円形光源による直接昼光率の公式は，長方形光源の場合に比べて利用度はそれほど高くない。また実際の円形採光面は壁厚のために，その有効部分が受照点に対して完全な円形をなしていないために，正確には単純な円形光源に対する直接昼光率の算定式を適用できない。従って，鉛直円形光源による直接昼光率の算定式は，それが求められても実地には近似的な値しか与え得ないことがある。しかし，円形中庭に面する建物外壁面上の点，中庭内部の諸点などに対しては水平な円形光源の直接昼光率の算定式が求められれば，それらは正確に適用することができる。

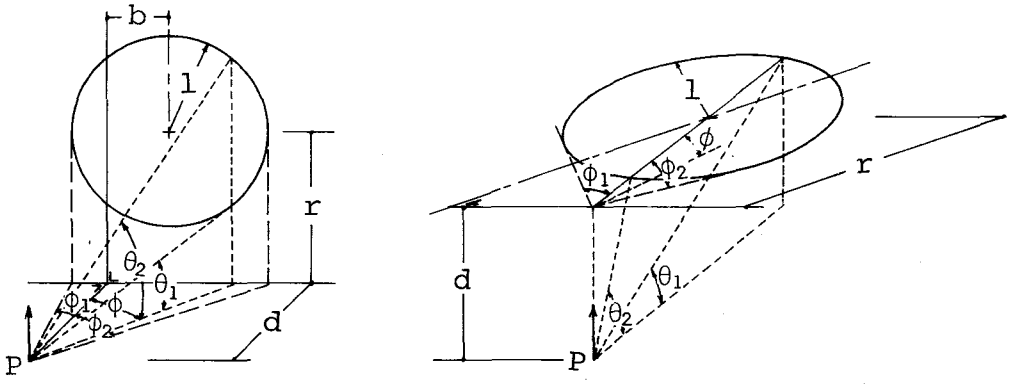
ここでは鉛直な円形光源と水平な円形光源とについて，前章までに求めたような3種の直接昼光率を求めることを試みる。

式の誘導はこれまでと同様に下記の3式の積分による。

$$U(\theta)_H=\frac{100}{28\pi}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[8\sin^3\theta+6\sin^2\theta-3]_{\theta_1}^{\theta_2}\,d\theta \quad \cdots\cdots (4.1)$$

$$U(\theta)_{V1}=\frac{100}{28\pi}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[-8\cos^3\theta+6\sin\theta\cos\theta+6\theta]_{\theta_1}^{\theta_2}\cos\phi\cdot d\phi \quad \cdots\cdots (4.2)$$

$$U(\theta)_{V2}=\frac{100}{28\pi}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[-8\cos^3\theta+6\sin\theta\cos\theta+6\theta]_{\theta_1}^{\theta_2}\sin\phi\cdot d\phi \quad \cdots\cdots (4.3)$$



(a)　鉛直円形光源　　(b)　水平円形光源

図－4.1

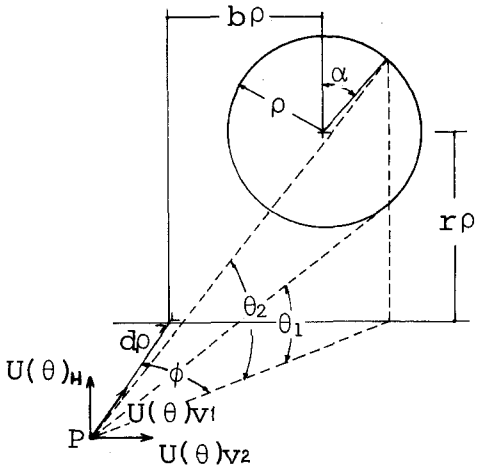
式中の θ_1，θ_2；ϕ_1，ϕ_2 などは図－4.1 に示す角で，一般に ϕ の関数である。θ_1，θ_2 の値は同図において，P の位置によって異なり，積分限界 ϕ_1，ϕ_2 も P の位置，r の値の如何によって相違があり，式（4.1）～（4.3）の積分はかなり複雑となる。その上，被積分関数もまた，直線形態を有する光源の場合に比較すると積分遂行に困難な形をとる。

4.2 鉛直円形光源による直接昼光率 [1), 2), 6)]

図－4.2 に示すように，円形光源の半径を ρ，光源中心線からの距離を $b\rho$，光源の中心の高さを $r\rho$，光源からの距離を $d\rho$ とする。

式（4.1）～（4.3）の θ，ϕ を図－4.2 を参照して，中心角 α で表わすと次のようになる。

$$\left.\begin{aligned}\tan\theta_1&=\frac{\gamma-\cos\alpha}{\sqrt{d^2+(b+\sin\alpha)^2}}\\ \tan\theta_2&=\frac{\gamma+\cos\alpha}{\sqrt{d^2+(b+\sin\alpha)^2}}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(a)}$$



図－4.2　鉛直円形光源

この α の変域は点 P の位置の如何によって，次のようである。

表－4.1　α の変域：α_1，α_2　（$r\geqq\rho$）

	$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$	$U(\theta)_{V2}$
$-\rho<b<\rho$	$\alpha_1=-\pi/2$，$\alpha_2=\pi/2$	$\alpha_1=-\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{1-b^2}}$，$\alpha_2=\pi/2$
$b\geqq\rho$	$\alpha_1=-\pi/2$，$\alpha_2=\pi/2$	$\alpha_1=-\pi/2$，$\alpha_2=\pi/2$

図－4.2 を参照して，

$$\cos\phi=\frac{d}{\sqrt{d^2+(b+\sin\alpha)^2}},\quad \sin\phi=\frac{b+\sin\alpha}{\sqrt{d^2+(b+\sin\alpha)^2}}\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(b)}$$

$$d\phi=\frac{d\cos\alpha}{d^2+(b+\sin\alpha)^2}d\alpha\cdots\cdots\cdots\cdots\text{(c)}$$

従って，式（4.1）～（4.3）は以上を参照して次のように表わされる。

$$U(\theta)_H=\frac{100}{28\pi}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2}[8(\sin^3\theta_2-\sin^3\theta_1)+6(\sin^2\theta_2-\sin^2\theta_1)]\frac{d\cos\alpha}{d^2+(b+\sin\alpha)^2}d\alpha \quad \cdots\cdots (4.4)$$

$$U(\theta)_{V1}=\frac{100}{28\pi}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2}[-8(\cos^3\theta_2-\cos^3\theta_1)+6(\sin\theta_2\cos\theta_2-\sin\theta_1\cos\theta_1)+6(\theta_2-\theta_1)]$$
$$\cdot\frac{d^2\cos\alpha}{(\sqrt{\alpha^2+(b+\sin\alpha)^2})^3}d\alpha \quad \cdots\cdots (4.5)$$

$$U(\theta)_{V2}=\frac{100}{28\pi}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2}[-8(\cos^3\theta_2-\cos^3\theta_1)+6(\sin\theta_2\cos\theta_2-\sin\theta_1\cos\theta_1)+6(\theta_2-\theta_1)]$$
$$\cdot\frac{(b+\sin\alpha)d\cos\alpha}{(\sqrt{d^2+(b+\sin\alpha)^2})^3}d\alpha \quad \cdots\cdots (4.6)$$

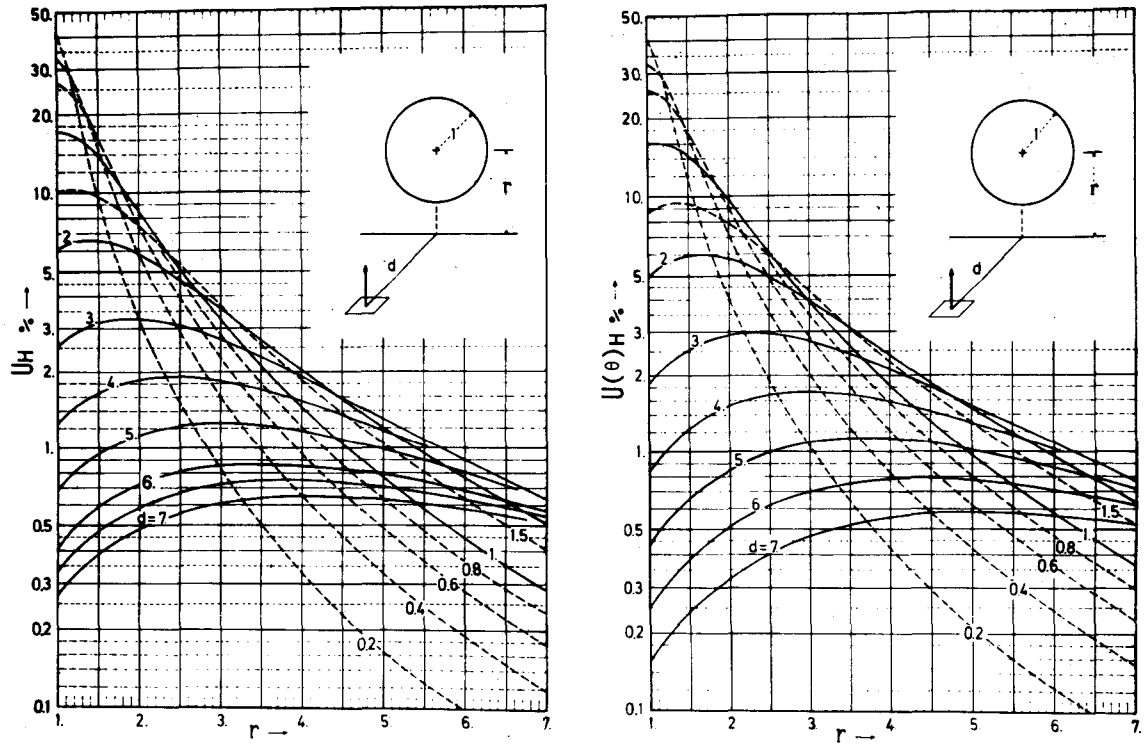
ただし，式(a)より

$$\theta_1=\tan^{-1}\left\{\frac{\gamma-\cos\alpha}{\sqrt{d^2+(b+\sin\alpha)^2}}\right\},\quad \theta_2=\tan^{-1}\left\{\frac{\gamma+\cos\alpha}{\sqrt{d^2+(b+\sin\alpha)^2}}\right\}$$

また，積分の上，下限 α_2，α_1 は表－4.1 に示す通りである。

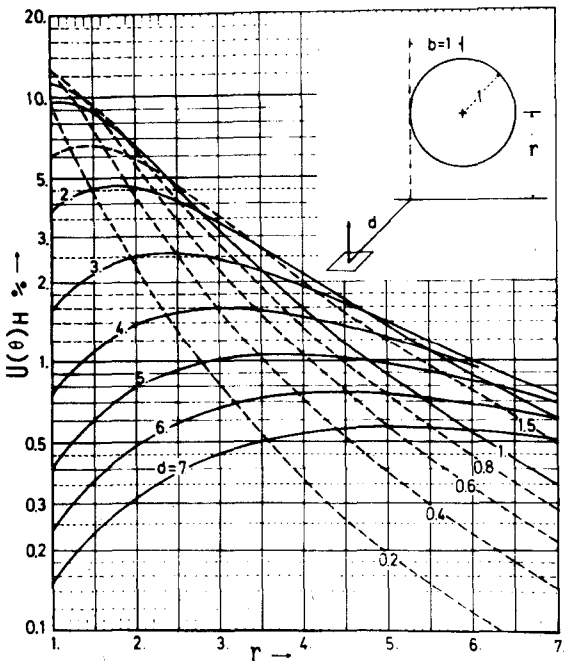
式（4.4）～（4.6）は一般には簡単な形の積分を求めることは困難である。ここでは，これらの式の数値積分を行なった結果を表－4.2 ～ 表－ 4.4 及び 図－4.3(b) ～ 図－4.7 に示す。図－4.3(b)～図－4.5 は，表－4.2 のうち，$b=0$，$b=1$，$b=2$ の場合の $U(\theta)_H$ についてプロットしたものであり，図－4.3(a) は均一輝度の場合で，図－4.3(b)と比較するために例示した。

また，図－4.6(a)　(b)はそれぞれ $b=0$，$b=1$ の場合の $U(\theta)_{V1}$ に関する図で，同図(a)の中の点線は均一輝度の場合の U_{V1} である。図－4.7 (a)，(b)はそれぞれ $b=0$，$b=1$ の場合の $U(\theta)_{V2}$ の図である。

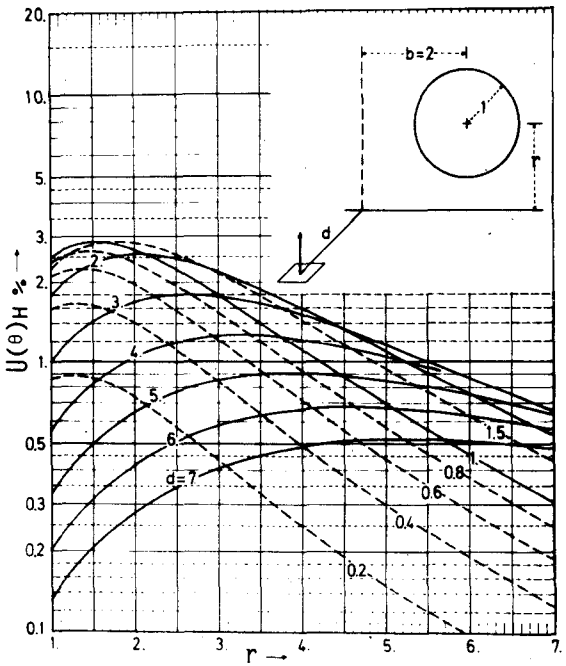


(a) 均一天空輝度の場合　　(b) 曇天空輝度分布の場合

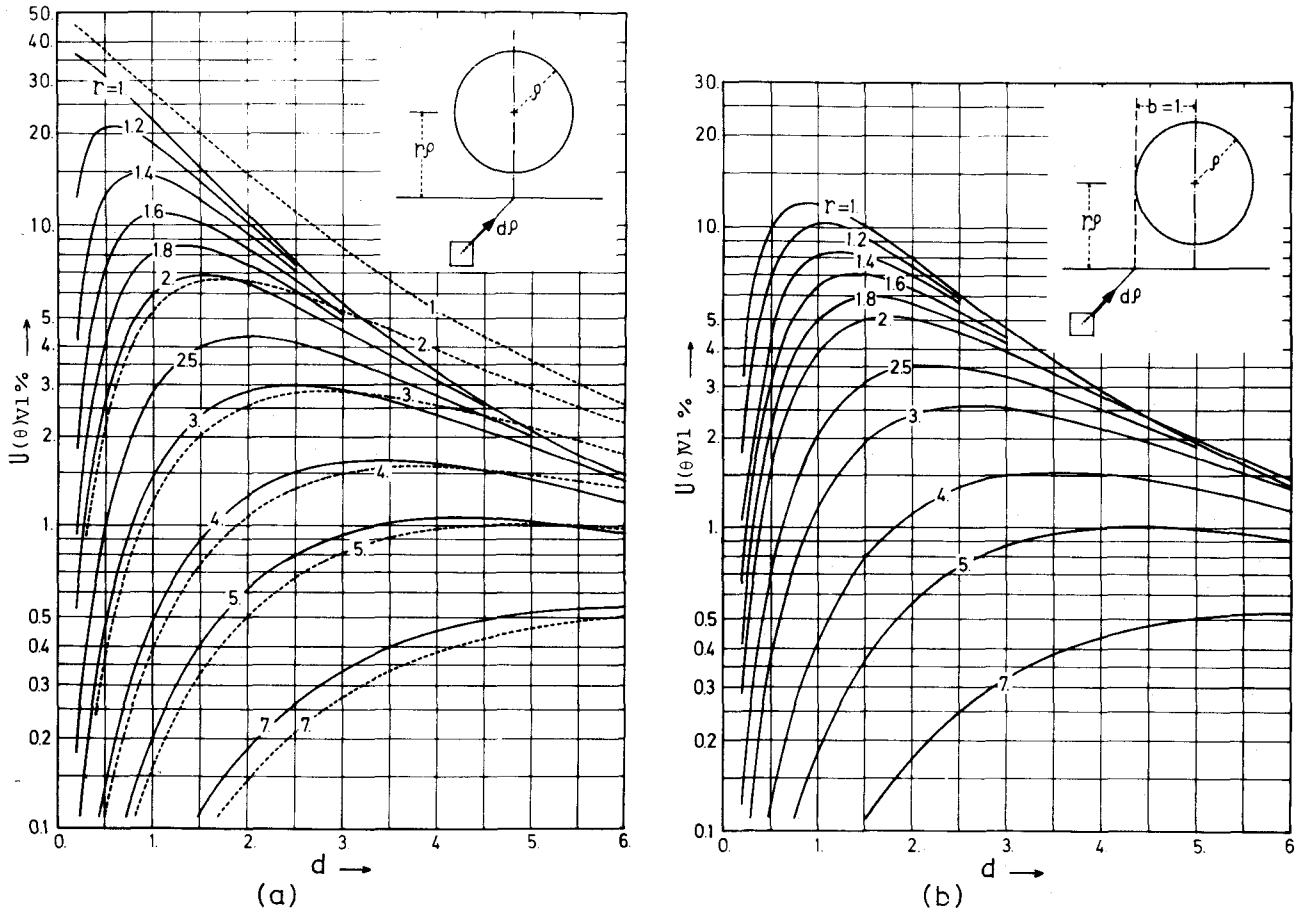
図－4.3 鉛直円形光源による水平面直接昼光率



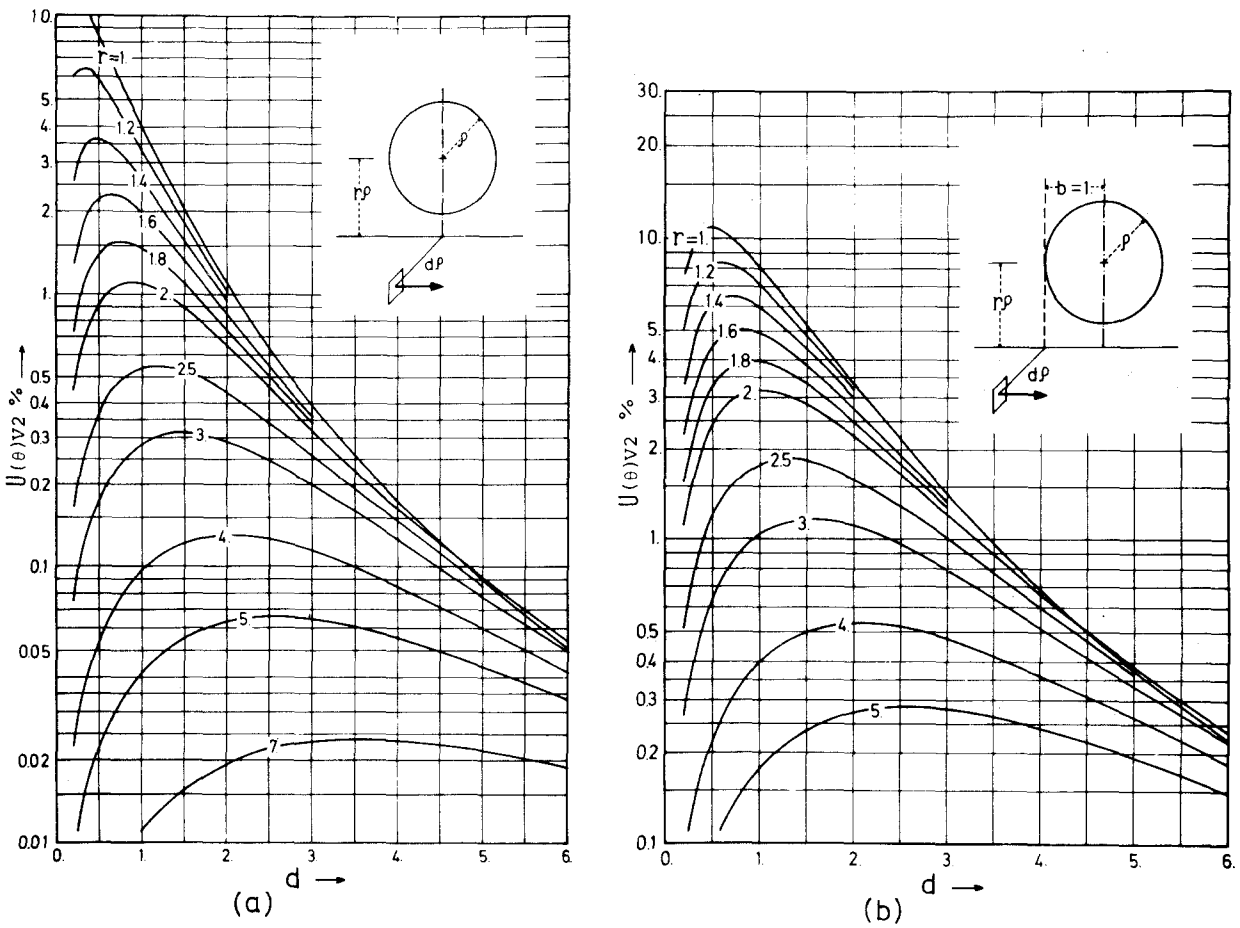
図－4.4　鉛直円形光源による
水平面直接昼光率



図－4.5　鉛直円形光源による
水平面直接昼光率



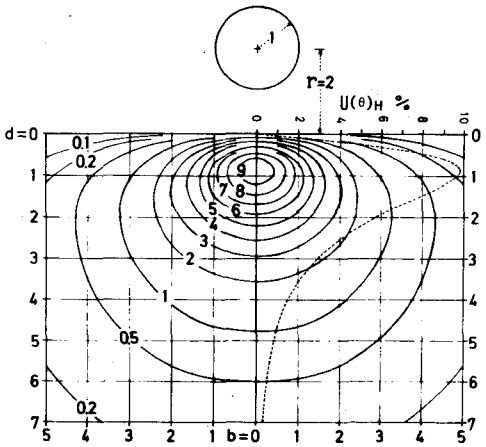
図－4.6　鉛直円形光源による鉛直面直接昼光率



図－4.7　鉛直円形光源による鉛直面直接昼光率

図－4.3 (a)と同図(b)とを比較してみると，光源が低い位置にあり（r が小），受照点が光源から遠い場合（d が大）には，$U(\theta)_H$ は U_H よりも小さくなる。光源が高い位置にある場合（r が大）は，距離 d の如何にかかわらず $U(\theta)_H$ は U_H よりも大である。また受照点が光源に近い場合（$d<1$）には，光源の高さ r に関係なく $U(\theta)_H$ は U_H よりも大となる傾向を示している。

図－4.8 は1例として，$\rho=1$，$r=2$ とした場合の水平受照面上の $U(\theta)_H$ の分布を示す。図中の点線は中心線上（$b=0$）における室奥方向への値をプロットしたものである。



図－4.8

鉛直面に関する直接昼光率 $U(\theta)_{V1}$, U_{V1} については図－4.6(a)に示すように，光源の高さ r が大で，光源からの距離 d が小の場合，すなわち，受照点から光源を見上げる高度が大である場合には，光源を均一輝度と考えた場合の U_{V1} よりも $U(\theta)_{V1}$ の方が大であり，同様の高度が小さい場合にはその逆となる。

表－4.2　鉛直円形光源による水平面直接昼光率 $U(\theta)_H$

b=0.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	40.7130	27.9357	15.2563	9.0565	5.8521	4.0256	1.8923	1.0476	0.4235	0.2127	0.0763
0.4	32.6020	28.4145	20.6535	14.2581	9.9706	7.1756	3.5595	2.0158	0.8305	0.4203	0.1516
0.6	25.8100	24.1923	20.1691	15.6840	11.9142	9.0633	4.8456	2.8407	1.2059	0.6180	0.2252
0.8	20.2925	19.8157	17.7946	15.0046	12.2139	9.8022	5.6935	3.4833	1.5379	0.8015	0.2961
1.0	15.9080	16.0170	15.0892	13.4596	11.5656	9.7258	6.1309	3.9316	1.8182	0.9674	0.3637
1.5	8.7230	9.3023	9.4424	9.1893	8.6444	7.9247	5.9574	4.3045	2.2735	1.2907	0.5139
2.0	4.9564	5.5047	5.8538	6.0010	5.9668	5.7863	4.9569	3.9780	2.4099	1.4761	0.6319
2.5	2.9578	3.3797	3.7098	3.9379	4.0638	4.0877	3.8606	3.3741	2.3204	1.5382	0.7149
3.0	1.8561	2.1631	2.4272	2.6397	2.7963	2.8968	2.9304	2.7403	2.1054	1.5070	0.7638
4.0	0.8353	0.9961	1.1476	1.2856	1.4068	1.5088	1.6755	1.7235	1.5745	1.2906	0.7774
5.0	0.4330	0.5223	0.6098	0.6939	0.7728	0.8451	0.9911	1.0822	1.1152	1.0174	0.7167
6.0	0.2493	0.3024	0.3556	0.4081	0.4590	0.5077	0.6154	0.6982	0.7819	0.7739	0.6231
7.0	0.1553	0.1889	0.2230	0.2570	0.2908	0.3238	0.4008	0.4662	0.5534	0.5822	0.5234

b=0.5

d	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	30.8681	18.4247	11.0252	7.0850	4.8351	3.4554	1.7192	0.9807	0.4082	0.2078	0.0753
0.4	27.2810	22.0884	16.1541	11.5673	8.3902	6.2220	3.2440	1.8895	0.8007	0.4106	0.1498
0.6	22.1738	20.1233	16.6990	13.1917	10.2463	7.9648	4.4368	2.6680	1.1634	0.6038	0.2225
0.8	17.7131	17.0595	15.2778	12.9879	10.7195	8,7348	5.2425	3.2800	1.4848	0.7834	0.2927
1.0	14.0709	14.0943	13.2752	11.9067	10.3269	8.7794	5.6793	3.7132	1.7570	0.9459	0.3595
1.5	7.9369	8.4761	8.6238	8.4231	7.9617	7.3395	5.5991	4.0981	2.2032	1.2635	0.5081
2.0	4.6115	5.1316	5.4692	5.6215	5.6063	5.4549	4.7151	3.8164	2.3428	1.4471	0.6250
2.5	2.7983	3.2022	3.5207	3.7439	3.3714	3.9103	3.7071	3.2587	2.2628	1.5104	0.7074
3.0	1.7777	2.0737	2.3295	2.5365	2.6905	2.7912	2.8346	2.6613	2.0593	1.4821	0.7563
4.0	0.8126	0.9694	1.1174	1.2524	1.3713	1.4718	1.6374	1.6876	1.5478	1.2731	0.7705
5.0	0.4250	0.5126	0.5987	0.6814	0.7591	0.8304	0.9748	1.0655	1.1005	1.0062	0.7112
6.0	0.2460	0.2984	0.3509	0.4027	0.4531	0.5012	0.6078	0.6900	0.7738	0.7669	0.6189
7.0	0.1537	0.1870	0.2207	0.2545	0.2880	0.3207	0.3970	0.4620	0.5488	0.5779	0.5204

表-4.2 （つづき）

b=1.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	9.1712	6.8065	5.0828	3.8455	2.9540	2.3042	1.3179	0.8131	0.3668	0.1939	0.0727
0.4	12.6841	10.5275	8.4550	6.7081	5.3198	4.2426	2.5062	1.5721	0.7202	0.3834	0.1446
0.6	12.5597	11.3939	9.8371	8.2458	6.8118	5.5997	3.4682	2.2317	1.0480	0.5641	0.2148
0.8	11.1663	10.7685	9.8511	8.6818	7.4732	6.3490	4.1573	2.7626	1.3403	0.7325	0.2826
1.0	9.5109	9.5744	9.1537	8.4114	7.5147	6.5908	4.5745	3.1525	1.5901	0.8854	0.3472
1.5	5.9911	6.4487	6.6273	6.5560	6.2906	5.8950	4.6876	3.5564	2.0099	1.1868	0.4912
2.0	3.7352	4.1830	4.4901	4.6528	4.6825	4.6009	4.0804	3.3835	2.1565	1.3649	0.6050
2.5	2.3812	2.7369	3.0236	3.2325	3.3622	3.4173	3.2941	2.9438	2.1020	1.4311	0.6857
3.0	1.5673	1.8335	2.0662	2.2578	2.4041	2.5044	2.5719	2.4424	1.9294	1.4108	0.7342
4.0	0.7494	0.8951	1.0332	1.1598	1.2721	1.3680	1.5300	1.5860	1.4715	1.2226	0.7506
5.0	0.4021	0.4852	0.5671	0.6459	0.7201	0.7885	0.9281	1.0176	1.0580	0.9734	0.6951
6.0	0.2363	0.2867	0.3373	0.3873	0.4359	0.4824	0.5859	0.6663	0.7501	0.7464	0.6068
7.0	0.1492	0.1815	0.2142	0.2471	0.2796	0.3115	0.3859	0.4495	0.5353	0.5652	0.5115

b=1.5

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	2.5191	2.3248	2.0729	1.8086	1.5578	1.3329	0.8977	0.6136	0.3101	0.1736	0.0686
0.4	4.3155	4.0937	3.7338	3.3174	2.8990	2.5089	1.7231	1.1916	0.6097	0.3434	0.1365
0.6	5.1912	5.0922	4.7826	4.3556	3.8848	3.4188	2.4187	1.7037	0.8893	0.5059	0.2028
0.8	5.3563	5.4251	5.2498	4.9102	4.4817	4.0223	2.9514	2.1287	1.1410	0.6577	0.2669
1.0	5.1012	5.3121	5.2825	5.0689	4.7351	4.3378	3.3129	2.4555	1.3588	0.7963	0.3281
1.5	3.8578	4.2270	4.4320	4.4833	4.4063	4.2328	3.5747	2.8563	1.7378	1.0729	0.4648
2.0	2.6897	3.0453	3.3083	3.4739	3.5465	3.5376	3.2604	2.8025	1.8901	1.2420	0.5736
2.5	1.8498	2.1408	2.3832	2.5693	2.6967	2.7675	2.7362	2.5071	1.8681	1.3115	0.6516
3.0	1.2850	1.5100	1.7100	1.8788	2.0125	2.1099	2.2042	2.1303	1.7375	1.3025	0.6994
4.0	0.6584	0.7879	0.9113	1.0255	1.1279	1.2165	1.3719	1.4351	1.3558	1.1445	0.7189
5.0	0.3676	0.4440	0.5194	0.5923	0.6612	0.7251	0.8571	0.9444	0.9922	0.9222	0.6693
6.0	0.2214	0.2688	0.3163	0.3634	0.4093	0.4533	0.5518	0.6292	0.7129	0.7141	0.5872
7.0	0.1420	0.1728	0.2040	0.2354	0.2665	0.2970	0.3684	0.4299	0.5138	0.5449	0.4972

表-4.2 （つづき）

b=2.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	0.8588	0.8902	0.8837	0.8493	0.7970	0.7351	0.5739	0.4352	0.2498	0.1500	0.0634
0.4	1.5855	1.6574	1.6585	1.6057	1.5167	1.4070	1.1110	0.8492	0.4921	0.2969	0.1262
0.6	2.1008	2.2227	2.2503	2.2026	2.1013	1.9666	1.5805	1.2231	0.7197	0.4378	0.1876
0.8	2.3931	2.5668	2.6344	2.6123	2.5225	2.3868	1.9617	1.5432	0.9267	0.5702	0.2470
1.0	2.4968	2.7154	2.8266	2.8420	2.7804	2.6631	2.2456	1.8008	1.1086	0.6917	0.3037
1.5	2.2618	2.5365	2.7273	2.8339	2.8638	2.8295	2.5563	2.1663	1.4380	0.9382	0.4312
2.0	1.7869	2.0508	2.2616	2.4137	2.5070	2.5459	2.4551	2.2017	1.5900	1.0950	0.5334
2.5	1.3428	1.5671	1.7610	1.9182	2.0358	2.1139	2.1552	2.0356	1.5985	1.1669	0.6077
3.0	0.9952	1.1756	1.3394	1.4816	1.5988	1.6894	1.8027	1.7807	1.5116	1.1698	0.6546
4.0	0.5551	0.6658	0.7722	0.8716	0.9619	1.0414	1.1869	1.2560	1.2145	1.0466	0.6777
5.0	0.3261	0.3942	0.4617	0.5273	0.5896	0.6478	0.7700	0.8538	0.9095	0.8567	0.6355
6.0	0.2028	0.2462	0.2900	0.3334	0.3757	0.4166	0.5087	0.5822	0.6651	0.6720	0.5613
7.0	0.1328	0.1616	0.1909	0.2203	0.2496	0.2782	0.3458	0.4043	0.4858	0.5182	0.4781

b=3.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	0.1668	0.1909	0.2097	0.2231	0.2310	0.2341	0.2253	0.2026	0.1480	0.1033	0.0514
0.4	0.3230	0.3701	0.4074	0.4340	0.4502	0.4569	0.4415	0.3983	0.2926	0.2049	0.1023
0.6	0.4598	0.5280	0.5826	0.6223	0.6473	0.6587	0.6405	0.5809	0.4302	0.3030	0.1521
0.8	0.5712	0.6579	0.7283	0.7805	0.8147	0.8320	0.8157	0.7453	0.5582	0.3960	0.2005
1.0	0.6547	0.7566	0.8406	0.9046	0.9481	0.9722	0.9628	0.8875	0.6740	0.4826	0.2470
1.5	0.7485	0.8732	0.9804	1.0670	1.1317	1.1746	1.1983	1.1351	0.9004	0.6646	0.3523
2.0	0.7231	0.8513	0.9658	1.0633	1.1416	1.2001	1.2644	1.2350	1.0314	0.7906	0.4386
2.5	0.6394	0.7587	0.8688	0.9663	1.0492	1.1160	1.2127	1.2215	1.0770	0.8607	0.5036
3.0	0.5392	0.6440	0.7431	0.8337	0.9139	0.9822	1.0974	1.1373	1.0575	0.8824	0.5471
4.0	0.3614	0.4356	0.5082	0.5775	0.6423	0.7014	0.8191	0.8904	0.9101	0.8252	0.5771
5.0	0.2388	0.2893	0.3398	0.3894	0.4371	0.4825	0.5811	0.6545	0.7212	0.7027	0.5515
6.0	0.1605	0.1951	0.2301	0.2649	0.2992	0.3326	0.4092	0.4726	0.5514	0.5698	0.4957
7.0	0.1109	0.1350	0.1595	0.1843	0.2090	0.2333	0.2912	0.3424	0.4170	0.4515	0.4291

表－4.3　鉛直円形光源による鉛直面直接昼光率 $U(\theta)\nu_1$

b=0.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	36.7105	12.7338	4.2480	1.8238	0.9320	0.5340	0.1799	0.0785	0.0226	0.0089	0.0022
0.4	33.1005	20.1119	10.4050	5.4832	3.0993	1.8769	0.6736	0.3015	0.0885	0.0350	0.0088
0.6	29.3140	21.2547	13.7372	8.5441	5.3735	3.4839	1.3651	0.6352	0.1926	0.0772	0.0197
0.8	25.6393	20.2709	14.7799	10.2996	7.0844	4.9064	2.1186	1.0339	0.3271	0.1334	0.0345
1.0	22.2434	18.5560	14.5711	10.9978	8.0967	5.9385	2.8216	1.4511	0.4825	0.2012	0.0530
1.5	15.3746	13.8844	12.0871	10.2118	8.4370	6.8680	3.9996	2.3479	0.9004	0.4017	0.1123
2.0	10.6979	10.1099	9.3019	8.3632	7.3771	6.4102	4.3267	2.8495	1.2649	0.6109	0.1840
2.5	7.6235	7.4134	7.0588	6.5969	6.0664	5.4271	4.1265	2.9802	1.5130	0.7933	0.2599
3.0	5.5932	5.5405	5.3952	5.1730	4.8922	4.5732	3.6989	2.8711	1.6377	0.9298	0.3329
4.0	3.2736	3.3086	3.3044	3.2642	3.1919	3.0876	2.7594	2.3668	1.6167	1.0555	0.4508
5.0	2.1018	2.1429	2.1661	2.1718	2.1610	2.1350	2.0144	1.8374	1.4205	1.0348	0.5184
6.0	1.4474	1.4811	1.5059	1.5216	1.5286	1.5270	1.4893	1.4123	1.1886	0.9408	0.5397
7.0	1.0510	1.0769	1.0979	1.1140	1.1250	1.1312	1.1261	1.0951	0.9775	0.8232	0.5280

b=0.5

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	19.6956	6.7650	2.7605	1.3473	0.7445	0.4487	0.1621	0.0732	0.0217	0.0087	0.0022
0.4	24.0454	13.1734	7.5406	4.2452	2.5323	1.5964	0.6091	0.2816	0.0852	0.0342	0.0087
0.6	23.3207	16.4840	10.7989	6.8350	4.5109	3.0112	1.2411	0.5945	0.1856	0.0754	0.0195
0.8	21.3560	16.7009	12.2485	8.6831	6.0999	4.3121	1.9383	0.9704	0.3154	0.1303	0.0341
1.0	19.0866	15.8618	12.5081	9.5241	7.1228	5.3008	2.5991	1.3664	0.4658	0.1966	0.0524
1.5	13.8242	12.5031	10.9210	9.2732	7.7100	6.3199	3.7448	2.2302	0.8717	0.3931	0.1110
2.0	9.9012	9.3737	8.6456	7.7969	6.9021	6.0208	4.1055	2.7293	1.2288	0.5986	0.1819
2.5	7.1943	7.0051	6.6809	6.2557	5.7652	5.2421	4.9560	2.8750	1.4747	0.7787	0.2572
3.0	5.3499	5.3040	5.1703	4.9635	4.7006	4.3988	3.5742	2.7861	1.6012	0.9142	0.3296
4.0	3.1834	3.2185	3.2158	3.1783	3.1097	3.0149	2.6952	2.3166	1.5889	1.0409	0.4468
5.0	2.0625	2.1031	2.1262	2.1323	2.1223	2.0974	1.9808	1.8087	1.4015	1.0233	0.5144
6.0	1.4280	1.4613	1.4859	1.5016	1.5086	1.5073	1.4709	1.3956	1.1761	0.9322	0.5361
7.0	1.0404	1.0661	1.0870	1.1029	1.1139	1.1201	1.1154	1.0851	0.9693	0.8170	0.5249

表-4.3 （つづき）

b=1.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	3.2257	1.7912	1.0520	0.6514	0.4223	0.2848	0.1217	0.0601	0.0195	0.0081	0.0021
0.4	8.1270	5.2575	3.3937	2.2299	1.5028	1.0401	0.4613	0.2319	0.0764	0.0319	0.0084
0.6	10.9658	8.0179	5.6883	4.0043	2.8355	2.0341	0.9524	0.4926	0.1667	0.0703	0.0188
0.8	11.9807	9.5190	7.2820	5.4580	4.0624	3.0297	1.5117	0.8101	0.2839	0.1217	0.0329
1.0	11.9476	10.0441	8.1311	6.4190	4.9968	3.8687	2.0628	1.1507	0.4203	0.1838	0.0506
1.5	10.1171	9.2287	8.1640	7.0462	5.9691	4.9910	3.1031	1.9234	0.7933	0.3688	0.1073
2.0	7.9079	7.5315	7.0001	6.3715	5.6994	5.0278	3.5286	2.4088	1.1288	0.5640	0.1761
2.5	6.0799	5.9429	5.6953	5.3631	4.9741	4.5539	3.4996	2.5888	1.3676	0.7372	0.2492
3.0	4.6999	4.6708	4.5669	4.4000	4.1837	3.9323	3.2333	2.5511	1.4982	0.8696	0.3199
4.0	2.9328	2.9678	2.9690	2.9387	2.8804	2.7979	2.5150	2.1747	1.5094	0.9991	0.4351
5.0	1.9507	2.9678	2.0127	2.0198	2.0119	1.9902	1.8846	1.7263	1.3468	0.9897	0.5026
6.0	1.3720	1.4042	1.4281	1.4436	1.4509	1.4503	1.4173	1.3471	1.1398	0.9072	0.5255
7.0	1.0097	1.0347	1.0550	1.0706	1.0815	1.0878	1.0840	1.0556	0.9453	0.7989	0.5159

b=1.5

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	0.6550	0.4961	0.3708	0.2765	0.2070	0.1561	0.0808	0.0447	0.0164	0.0072	0.0020
0.4	2.1924	1.7181	1.3198	1.0053	0.7653	0.5850	0.3093	0.1734	0.0644	0.0285	0.0080
0.6	3.8346	3.1309	2.4914	1.9541	1.5233	1.1869	0.6488	0.3712	0.1408	0.0629	0.0177
0.8	5.1034	4.3317	3.5724	2.8914	2.3150	1.8448	1.0504	0.6101	0.2405	0.1091	0.0311
1.0	5.8875	5.1648	4.3994	3.6689	3.0173	2.4612	1.4654	0.8863	0.3576	0.1650	0.0478
1.5	6.2697	5.8285	5.2769	4.6760	4.0744	3.5062	2.3337	1.5312	0.6833	0.3328	0.1015
2.0	5.5896	5.3794	5.0638	4.6768	4.2508	3.8134	2.7925	1.9820	0.9863	0.5125	0.1668
2.5	4.6782	4.6012	4.4429	4.2207	3.9527	3.6566	2.8880	2.1942	1.2124	0.6747	0.2367
3.0	3.8340	3.8246	3.7570	3.6397	3.4822	3.2950	2.7588	2.2175	1.3466	0.8019	0.3046
4.0	2.5727	2.6070	2.6130	2.5924	2.5478	2.4823	2.2505	1.9642	1.3890	0.9346	0.4166
5.0	1.7827	1.8194	1.8418	1.8503	1.8454	1.8281	1.7385	1.6005	1.2621	0.9471	0.4839
6.0	1.2855	1.3159	1.3387	1.3539	1.3616	1.3621	1.3341	1.2716	1.0828	0.8675	0.5084
7.0	0.9614	0.9852	1.0047	1.01198	1.0305	1.0368	1.0346	1.0091	0.9072	0.7700	0.5014

表-4.3 （つづき）

b=2.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	0.1945	0.1697	0.1444	0.1209	0.1001	0.0824	0.0504	0.0313	0.0131	0.0062	0.0019
0.4	0.7128	0.6280	0.5394	0.4551	0.3796	0.3145	0.1947	0.1218	0.0517	0.0246	0.0074
0.6	1.4012	1.2514	1.0892	0.9305	0.7848	0.6565	0.4143	0.2628	0.1133	0.0543	0.0164
0.8	2.1002	1.9048	1.6837	1.4596	1.2478	1.0566	0.6834	0.4412	0.1943	0.0943	0.0288
1.0	2.7007	2.4876	2.2340	1.9669	1.7062	1.4643	0.9741	0.6421	0.2903	0.1430	0.0442
1.5	3.5506	3.3807	3.1462	2.8727	2.5825	2.2932	1.6443	1.1500	0.5629	0.2904	0.0941
2.0	3.6450	3.5539	3.3975	3.1928	2.9569	2.7049	2.0805	1.5454	0.8265	0.4509	0.1550
2.5	3.3616	3.3313	3.2465	3.1170	2.9535	2.7665	2.2577	1.7715	1.0342	0.5993	0.2206
3.0	2.9523	2.9585	2.9229	2.8507	2.7481	2.6217	2.2445	1.8458	1.1686	0.7191	0.2849
4.0	2.1653	2.1980	2.2082	2.1972	2.1666	2.1190	1.9419	1.7152	1.2423	0.8538	0.3925
5.0	1.5804	1.6140	1.6355	1.6451	1.6434	1.6311	1.5598	1.4452	1.1558	0.8700	0.4593
6.0	1.1770	1.2052	1.2266	1.2413	1.2494	1.2510	1.2289	1.1756	1.0096	0.8161	0.4859
7.0	0.8992	0.9215	0.9399	0.9543	0.9647	0.9711	0.9706	0.9488	0.8574	0.7321	0.4821

b=3.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	0.0340	0.0330	0.0314	0.0294	0.0271	0.0248	0.0190	0.0142	0.0077	0.0043	0.0015
0.4	0.1315	0.1278	0.1219	0.1143	0.1057	0.0966	0.0745	0.5557	0.0304	0.0169	0.0059
0.6	0.2802	0.2730	0.2609	0.2453	0.2276	0.2087	0.1620	0.1218	0.0669	0.0374	0.0133
0.8	0.4628	0.4523	0.4337	0.4093	0.3811	0.3507	0.2747	0.2082	0.1157	0.0651	0.0233
1.0	0.6610	0.6481	0.6240	0.5913	0.5529	0.5111	0.4046	0.3095	0.1746	0.0992	0.0359
1.5	1.1235	1.1118	1.0821	1.0377	0.9824	0.9199	0.7514	0.5915	0.3491	0.2046	0.0767
2.0	1.4347	1.4322	1.4085	1.3668	1.3106	1.2435	1.0506	0.8541	0.5318	0.3241	0.1273
2.5	1.5739	1.5827	1.5707	1.5401	1.4938	1.4349	1.2519	1.0507	0.6920	0.4402	0.1826
3.0	1.5835	1.6014	1.6009	1.5834	1.5508	1.5054	1.3516	1.1685	0.8129	0.5406	0.2378
4.0	1.4046	1.4310	1.4450	1.4471	1.4378	1.4183	1.3323	1.2098	0.9276	0.6715	0.3339
5.0	1.1559	1.1821	1.2006	1.2114	1.2147	1.2109	1.1735	1.1045	0.9144	0.7123	0.3982
6.0	0.9314	0.9541	0.9720	0.9851	0.9934	0.9970	0.9868	0.9527	0.8358	0.6911	0.4288
7.0	0.7507	0.7693	0.7850	0.7976	0.8071	0.8135	0.8166	0.8026	0.7352	0.6374	0.4324

表－4.4　鉛直円形光源による鉛直面直接昼光率 $U(\theta)_{V2}$

b=0.0

d＼r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	13.5939	6.0142	2.5795	1.2932	0.7286	0.4457	0.1648	0.0754	0.0227	0.0091	0.0023
0.4	9.8368	6.2810	3.5830	2.0665	1.2522	0.7986	0.3106	0.1452	0.0445	0.0180	0.0046
0.6	7.2105	5.2692	3.5298	2.2980	1.5090	1.0148	0.4240	0.2049	0.0646	0.0264	0.0069
0.8	5.3345	4.2011	3.0985	2.2057	1.5549	1.1028	0.4995	0.2516	0.0825	0.0342	0.0090
1.0	3.9831	3.2999	2.5956	1.9728	1.4741	1.0970	0.5391	0.2844	0.0976	0.0413	0.0111
1.5	2.0080	1.8032	1.5640	1.3199	1.0918	0.8914	0.5252	0.3123	0.1222	0.0552	0.0156
2.0	1.0863	1.2232	0.9387	0.8422	0.7419	0.6445	0.4361	0.2887	0.1296	0.0632	0.0192
2.5	0.6297	0.6113	0.5810	0.5421	0.4978	0.4511	0.3381	0.2445	0.1249	0.0659	0.0218
3.0	0.3884	0.3844	0.3739	0.3581	0.3383	0.3158	0.2552	0.1981	0.1133	0.0645	0.0233
4.0	0.1719	0.1737	0.1734	0.1713	0.1674	0.1621	0.1445	0.1238	0.0846	0.0553	0.0237
5.0	0.0886	0.0904	0.0913	0.0916	0.0911	0.0900	0.0848	0.0773	0.0597	0.0435	0.0218
6.0	0.0510	0.0522	0.0530	0.0536	0.0538	0.0538	0.0524	0.0497	0.0418	0.0331	0.0190
7.0	0.0318	0.0325	0.0332	0.0337	0.0340	0.0342	0.0340	0.0331	0.0295	0.0248	0.0159

b=0.5

d＼r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	14.5253	7.5875	3.9958	2.2832	1.3997	0.9068	0.3648	0.1744	0.0547	0.0224	0.0058
0.4	12.9789	9.1621	5.8795	3.7370	2.4325	1.6345	0.6887	0.3361	0.1074	0.0442	0.0115
0.6	10.6160	8.3861	6.1003	4.2731	2.9762	2.0950	0.9425	0.4747	0.1561	0.0650	0.0171
0.8	8.5192	7.1277	5.5943	4.2157	3.1187	2.3005	1.1143	0.5838	0.1992	0.0843	0.0225
1.0	6.7938	5.8981	4.8674	3.8698	3.0082	2.3146	1.2079	0.6611	0.2357	0.1018	0.0277
1.5	3.8654	3.5569	3.1661	2.7409	2.3223	1.9378	1.1923	0.7303	0.2957	0.1359	0.0391
2.0	2.2634	2.1597	2.0097	1.8297	1.6356	1.4406	1.0046	0.6804	0.3145	0.1557	0.0481
2.5	1.3832	1.3520	1.2953	1.2190	1.1294	1.0326	0.7899	0.5811	0.3039	0.1626	0.0545
3.0	0.8843	0.8785	0.8584	0.8264	0.7851	0.7370	0.6039	0.4746	0.2766	0.1595	0.0582
4.0	0.4085	0.4133	0.4133	0.4089	0.4005	0.3888	0.3488	0.3009	0.2079	0.1371	0.0593
5.0	0.2155	0.2198	0.2222	0.2230	0.2220	0.2196	0.2077	0.1900	0.1478	0.1083	0.0548
6.0	0.1256	0.1285	0.1307	0.1321	0.1327	0.1326	0.1295	0.1230	0.1039	0.0826	0.0477
7.0	0.0789	0.0808	0.0824	0.0836	0.0845	0.0850	0 0846	0 0824	0 0737	0.0622	0.0401

表-4.4 （つづき）

b=1.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	7.6517	5.0052	3.3145	2.2429	1.5545	1.1030	0.5128	0.2660	0.0907	0.0385	0.0104
0.4	10.5619	7.7346	5.5118	3.9123	2.7997	2.0309	0.9753	0.5142	0.1782	0.0762	0.0206
0.6	10.4951	8.3800	6.4155	4.8103	3.5855	2.6810	1.3498	0.7300	0.2593	0.1121	0.0306
0.8	9.4004	7.9450	6.4338	5.0683	3.9353	3.0405	1.6182	0.9037	0.3316	0.1455	0.0402
1.0	8.0801	7.0957	5.9919	4.9165	3.9599	3.1577	1.7809	1.0313	0.3934	0.1759	0.0494
1.5	5.2058	4.8413	4.3707	3.8491	3.3240	2.8293	1.8262	1.1639	0.4973	0.2358	0.0699
2.0	3.3057	3.1776	2.9839	2.7454	2.4825	2.2133	1.5911	1.1078	0.5337	0.2782	0.0861
2.5	2.1376	2.0993	2.0228	1.9163	1.7885	1.6478	1.2860	0.9644	0.5203	0.2844	0.0976
3.0	1.4227	1.4175	1.3902	1.3440	1.2827	1.2104	1.0052	0.8006	0.4776	0.2804	0.1045
4.0	0.6914	0.7003	0.7013	0.6950	0.6822	0.6637	0.5993	0.5206	0.3645	0.2430	0.1069
5.0	0.3752	0.3829	0.3874	0.3890	0.3877	0.3838	0.3642	0.3344	0.2622	0.1935	0.0990
6.0	0.2224	0.2277	0.2316	0.2342	0.2354	0.2354	0.2303	0.2192	0.1860	0.1484	0.0864
7.0	0.1413	0.1448	0.1477	0.1499	0.1514	0.1523	0.1519	0.1480	0.1328	0.1124	0.0729

b=1.5

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	3.2759	2.6165	2.0507	1.5930	1.2349	0.9597	0.5246	0.3012	0.1151	0.0517	0.0147
0.4	5.6130	4.6082	3.6943	2.9222	2.9982	1.8065	1.0069	0.5849	0.2263	0.1024	0.0292
0.6	6.7599	5.7359	4.7339	3.8379	3.0804	2.4620	1.4135	0.8364	0.3301	0.1508	0.0433
0.8	6.9918	6.1192	5.2005	4.3287	3.5549	2.8973	1.7250	1.0450	0.4235	0.1960	0.0570
1.0	6.6823	6.0041	5.2395	4.4722	3.7579	3.1257	1.9366	1.2056	0.5043	0.2373	0.0701
1.5	5.1112	4.8115	4.4156	3.9670	3.5036	3.0541	2.0909	1.4028	0.6451	0.3198	0.0993
2.0	3.6060	3.4936	3.3135	3.0850	2.8271	2.5570	1.9086	1.3769	0.7017	0.3702	0.1225
2.5	2.5064	2.4740	2.3992	2.2900	2.1555	2.0043	1.6033	1.2324	0.6936	0.3909	0.1392
3.0	1.7571	1.7563	1.7296	1.6804	1.6127	1.5310	1.2929	1.0478	0.6453	0.3883	0.1494
4.0	0.9131	0.9260	0.9290	0.9227	0.9079	0.8859	0.8063	0.7067	0.5038	0.3412	0.5536
5.0	0.5153	0.5260	0.5327	0.5353	0.5342	0.5296	0.5046	0.4656	0.3688	0.2750	0.1430
6.0	0.3129	0.3203	0.3259	0.3297	0.3317	0.3319	0.3254	0.3105	0.2651	0.2130	0.1254
7.0	0.2019	0.2069	0.2110	0.2142	0.2165	0.2179	0.2175	0.2123	0.1912	0.1626	0.1062

表-4.4 （つづき）

b=2.0

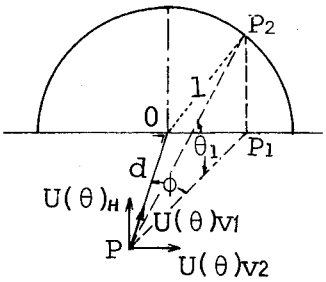
d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	1.5211	1.3539	1.1757	1.0031	0.8456	0.7076	0.4477	0.2850	0.1237	0.0596	0.0181
0.4	2.8094	2.5214	2.2070	1.8967	1.6095	1.3545	0.8667	0.5561	0.2435	0.1180	0.0359
0.6	3.7260	3.3833	2.9957	2.6025	2.2302	1.8934	1.2330	0.8010	0.3562	0.1740	0.0534
0.8	4.2504	3.9106	3.5091	3.0879	2.6780	2.2984	1.5305	1.0107	0.4587	0.2266	0.0703
1.0	4.4429	4.1421	3.7681	3.3612	2.9530	2.5652	1.7523	1.1796	0.5487	0.2749	0.0865
1.5	4.0508	3.8857	3.6463	3.3584	3.0458	2.7283	1.9958	1.4193	0.7118	0.3729	0.1228
2.0	3.2250	3.1582	3.0347	2.8678	2.6714	2.4582	1.9180	1.4430	0.7872	0.4352	0.1519
2.5	2.4422	2.4264	2.3721	2.2855	2.1738	2.0443	1.6851	1.3347	0.7915	0.4638	0.1731
3.0	1.8230	1.8296	1.8111	1.7703	1.7108	1.6365	1.4107	1.1682	0.7486	0.4650	0.1864
4.0	1.0293	1.0454	1.0511	1.0468	1.0334	1.0119	0.9305	0.8249	0.6017	0.4161	0.1930
5.0	0.6103	0.6234	0.6319	0.6359	0.6356	0.6312	0.6046	0.5613	0.4508	0.3407	0.1810
6.0	0.3824	0.3916	0.3986	0.4035	0.4062	0.4068	0.4000	0.3831	0.3298	0.2673	0.1599
7.0	0.2520	0.2582	0.2634	0.2675	0.2704	0.2723	0.2723	0.2663	0.2410	0.2062	0.1362

b=3.0

d \ r	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	7.0
0.2	0.4546	0.4430	0.4237	0.3986	0.3700	0.3396	0.2642	0.1992	0.1100	0.0616	0.0220
0.4	0.8806	0.8593	0.8230	0.7757	0.7211	0.6629	0.5178	0.3918	0.2173	0.1222	0.0437
0.6	1.2541	1.2264	1.1774	1.1125	1.0370	0.9557	0.7512	0.5714	0.3196	0.1806	0.0650
0.8	1.5592	1.5289	1.4723	1.3956	1.3054	1.2072	0.9568	0.7331	0.4146	0.2361	0.0857
1.0	1.7886	1.7593	1.7002	1.6880	1.5195	1.4110	1.1295	0.8731	0.5006	0.2878	0.1055
1.5	2.0511	2.0346	1.9589	1.9107	1.8153	1.7059	1.4063	1.1169	0.6688	0.3963	0.1505
2.0	1.9891	1.9891	1.9603	1.9069	1.8333	1.7444	1.4846	1.2155	0.7663	0.4714	0.1874
2.5	1.7664	1.7782	1.7673	1.7360	1.6871	1.6238	1.4247	1.2026	0.8002	0.5132	0.2151
3.0	1.4961	1.5142	1.5152	1.5005	1.4717	1.4308	1.2900	1.1202	0.7859	0.5262	0.2337
4.0	1.0112	1.0305	1.0411	1.0432	1.0373	1.0240	0.9642	0.8777	0.6766	0.4922	0.2465
5.0	0.6729	0.6883	0.6992	0.7057	0.7079	0.7059	0.6850	0.6457	0.5364	0.4192	0.2356
6.0	0.4552	0.4663	0.4751	0.4816	0.4857	0.4876	0.4829	0.4667	0.4103	0.3400	0.2119
7.0	0.3161	0.3239	0.3305	0.3359	0.3399	0.3426	0.3441	0.3384	0.3104	0.2695	0.1834

4.3 鉛直半円形光源による直接昼光率 [1),2),6)]

図－4.9に示すように，鉛直半円形光源の軸上の水平面直接昼光率$U(\theta)_H$，鉛直面直接昼光率$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$を求める。この場合，$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$について右半分のみの精分を行なって，その値を2倍する。また，$U(\theta)_{V2}$については右半分の値をそのまま用いる。



図－4.9　半円形光源

図を参照して，

$$\left.\begin{array}{l}\theta_1=0,\ \sin\theta_2=\sqrt{1-d^2\tan^2\phi}/\sqrt{d^2+1},\ \cos\theta_2=d\sec\phi/\sqrt{d^2+1}\\ \phi_1=0,\ \phi_2=\tan^{-1}(1/d)\end{array}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (a)$$

上式(a)を考慮して，$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$は，式（4.1）～（4.3）より次のように表わされる。

$$U(\theta)_H=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\phi_2}[8\sin^3\theta+6\sin^2\theta-3]_0^{\theta_2}d\phi$$

$$=\frac{100}{14\pi}\left[4\pi\left\{1-\frac{d(2d^2+3)}{2\sqrt{(d^2+1)^3}}\right\}+6\left(\tan^{-1}\frac{1}{d}-\frac{d}{d^2+1}\right)\right]\ \%\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.7)$$

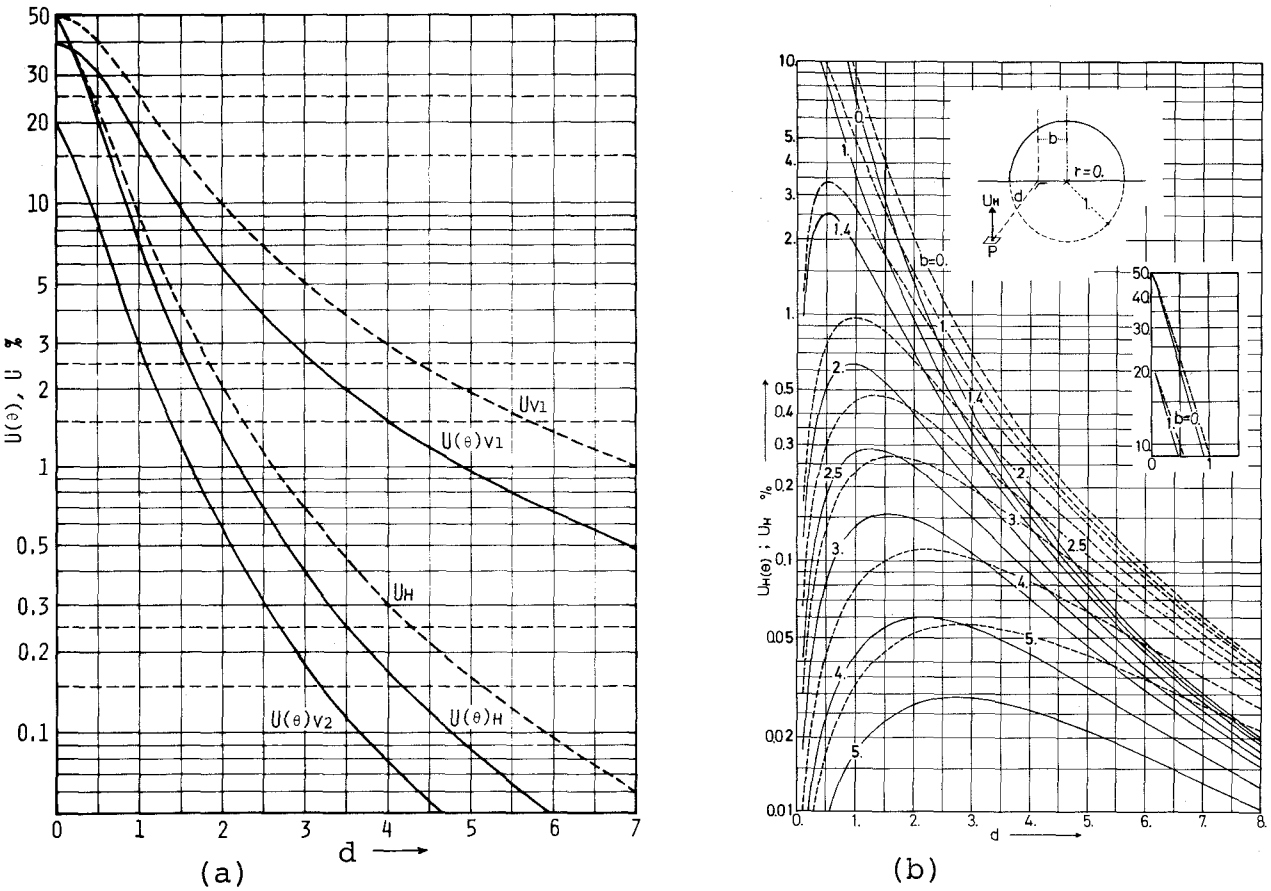
$$U(\theta)_{V1}=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\phi_2}[-8\cos^3\theta+6\sin\theta\cdot\cos\theta+6\theta]_0^{\theta_2}\cos\phi d\phi$$

$$=\frac{100}{14\pi}\left\{\frac{8}{\sqrt{(d^2+1)^3}}+\frac{3\pi}{d^2+1}\right\}\ \%\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.8)$$

$$U(\theta)_{V2}=\frac{100}{28\pi}\int_0^{\phi_2}[-8\cos^3\theta+6\sin\theta\cos\theta+6\theta]_0^{\theta_2}\sin\phi d\phi$$

$$=\frac{100}{28\pi}\left[8\left\{1-\frac{d(2d^2+3)}{2\sqrt{(d^2+1)^3}}\right\}+6\left\{\tan^{-1}\frac{1}{d}-\frac{d}{d^2+1}\right\}\right]\ \%\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4.9)$$

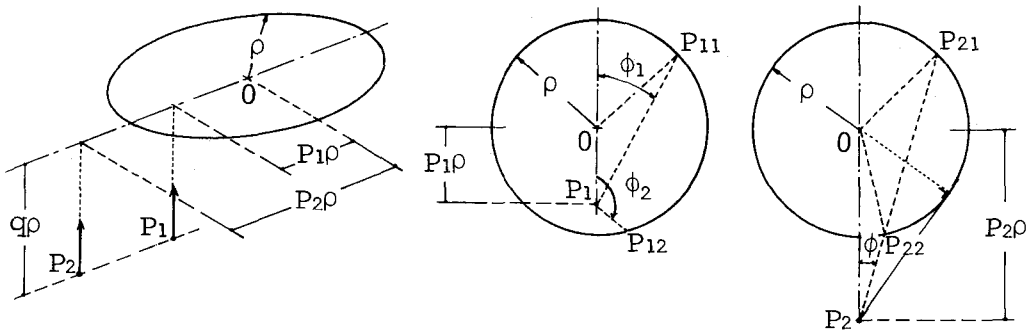
以上の式（4.7），（4.8），（4.9）が鉛直半円形光源の中心軸上（$r=0$，$b=0$）による直接昼光率の計算式で，それらを図－4.10(a)に示す。同図(b)は$r=0$，$b>0$の場合を数値積分によって求めてプロットしたものである。また，図中の点線は均一輝度天空の場合を示す。



図－4.10　鉛直半円形光源による直接昼光率

4.4　水平円形光源による直接昼光率 [3)〜5)]

前述の式 (4.1)〜(4.3) において，高度 θ は点 P が光源内にあるか，円外にあるかによって異なる。



(a) 〔見取図〕　　(b) 〔平面〕　　(c) 〔平面〕

図－4.11　水平円形光源による直接昼光率

図－4.11(a)において，$\overline{OP_1}<\rho$，すなわち，P が P_1 のように円周内部にある場合には，同図(b)を参照して，式 (4.1)〜(4.3) の積分の上,下限を次のようにとればよい。

表－4.5　ϕ の上,下限：ϕ_2，ϕ_1　($\overline{OP_1}<\rho$)

	$U(\theta)_H$	$U(\theta)_{V1}$	$U(\theta)_{V2}$
ϕ_1	0	0	0
ϕ_2	π	$\pi/2$	π

このように ϕ の範囲を定めると，式 (4.1)〜(4.3) の θ_1，θ_2 はそれぞれ次のように表わすことができる。

$$\overline{OP_1}<\rho \quad \text{のとき,} \quad \left.\begin{aligned} \tan\theta_1 &= \frac{q}{P_1^2-1}\left\{P_1\cos\phi-\sqrt{P_1^2\cos^2\phi-(P_1^2-1)}\right\} \\ \theta_2 &= \pi/2 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (a)$$

また，点 P が円周外にある場合 ($\overline{OP_2}>\rho$) には図－4.11(c)を参照して，

$$\left.\begin{aligned}\tan\theta_1&=\frac{q\rho}{P_2P_{21}}=\frac{q}{P_2^2-1}\left\{P_2\cos\phi-\sqrt{P_2^2\cos^2\phi-(P_2^2-1)}\right\}\\ \tan\theta_2&=\frac{q\rho}{P_2P_{22}}=\frac{q}{P_2^2-1}\left\{P_2\cos\phi+\sqrt{P_2^2\cos^2\phi-(P_2^2-1)}\right\}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\text{(b)}$$

また，ϕの上，下限ϕ_2，ϕ_1は，$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$の各直接昼光率に対して，いずれも下記のようになる。

$$\phi_1=0,\quad \phi_2=\tan^{-1}\left(1/\sqrt{P_2^2-1}\right)\cdots\cdots\text{(c)}$$

以上のことから，$\overline{OP_1}<\rho$のときを$U_1(\theta)_H$，$U_1(\theta)_{V1}$，$U_1(\theta)_{V2}$；$\overline{OP_2}>\rho$のときを$U_2(\theta)_H$，$U_2(\theta)_{V1}$，$U_2(\theta)_{V2}$と表わすことにすれば，式(4.1)～(4.3)は次のようになる。

$\overline{OP_1}<\rho$　のときは

$$U_1(\theta)_H=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\pi}[14-8\sin^3\theta_1-6\sin^2\theta_1]d\phi\quad\%\cdots\cdots(4.10)$$

$$U_1(\theta)_{V_1}=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\pi/2}[8\cos^3\theta_1-6\sin\theta_1\cos\theta_1-6\theta_1]\cos\phi d\phi\quad\%\cdots\cdots(4.11)$$

$$U_1(\theta)_{V_2}=\frac{100}{28\pi}\int_0^{\pi}[8\cos^3\theta_1-6\sin\theta_1\cos\theta_1-6\theta_1]\sin\phi d\phi\quad\%\cdots\cdots(4.12)$$

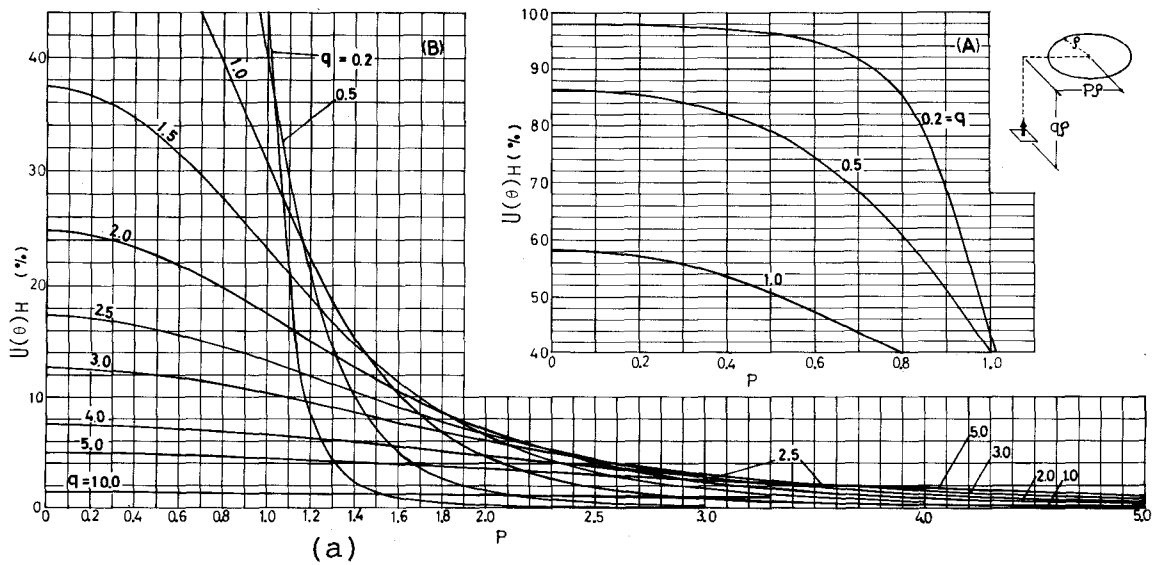
ただし，$\theta_1=\tan^{-1}\left[\frac{q}{P_1^2-1}\left\{P_1\cos\phi-\sqrt{P_1^2\cos^2\phi-(P_1^2-1)}\right\}\right]$

$\overline{OP_2}>\rho$の場合には，

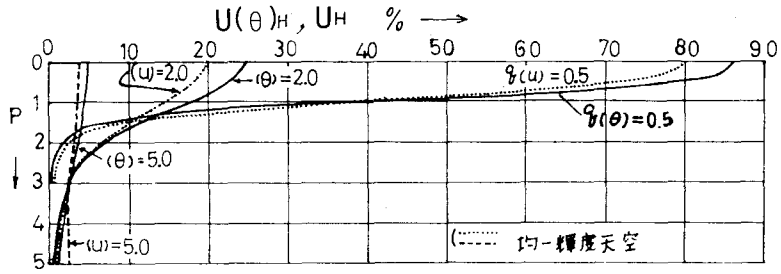
$$U_2(\theta)_H=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\phi_2}[8(\sin^3\theta_2-\sin^3\theta_1)+6(\sin^2\theta_2-\sin^2\theta_1)]d\phi\quad\%\cdots\cdots(4.13)$$

$$\begin{aligned}U_2(\theta)_{V_1}=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\phi_2}&[-8(\cos^3\theta_2-\cos^3\theta_1)+6(\sin\theta_2\cos\theta_2-\sin\theta_1\cos\theta_1)\\&+6(\theta_2-\theta_1)]\cos\phi d\phi\quad\%\cdots\cdots(4.14)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_2(\theta)_{V_2}=\frac{100}{28\pi}\int_0^{\phi_2}&[-8(\cos^3\theta_2-\cos^3\theta_1)+6(\sin\theta_2\cos\theta_2-\sin\theta_1\cos\theta_1)\\&+6(\theta_2-\theta_1)]\sin\phi d\phi\quad\%\cdots\cdots(4.15)\end{aligned}$$



(a)



(b)

図-4.12　水平円形光源による直接昼光率

ただし，$\theta_1=\tan^{-1}\left[\frac{q}{P_2^2-1}\left\{P_2\cos\phi-\sqrt{P_2^2\cos^2\phi-(P_2^2-1)}\right\}\right]$

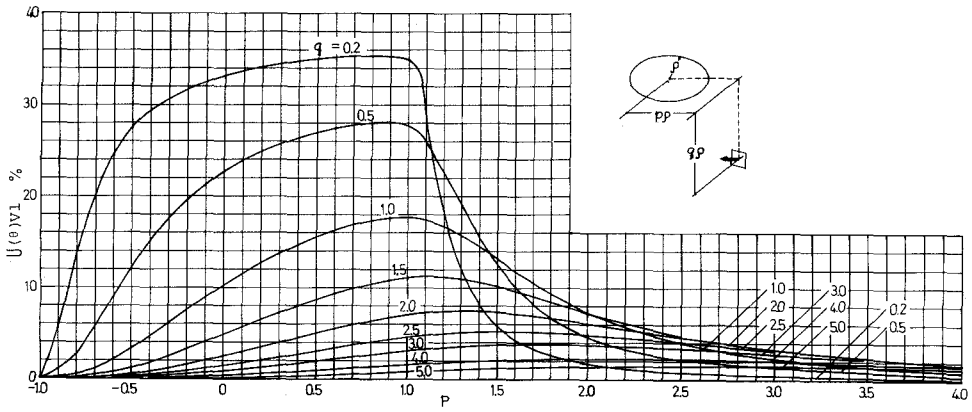
$$\theta_2=\tan^{-1}\left[\frac{q}{P_2^2-1}\left\{P_2\cos\phi+\sqrt{P_2^2\cos^2\phi+(P_2^2-1)}\right\}\right]$$

$$\phi_2=\tan^{-1}(1/\sqrt{P_2^2-1})$$

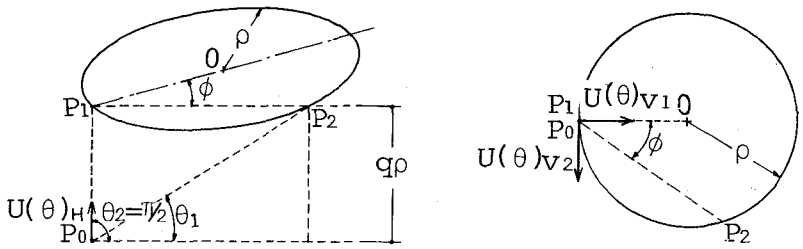
これらの式の場合の積分も一般に簡単な形で求めることができない。図－4.12は数値積分の結果を示す。

図－4.12(a)は水平面直接昼光率$U(\theta)_H$を示す。横軸にPをとって$q=$const.の$U(\theta)_H$の曲線を描いている。同図(*b*)は均一輝度天空を仮定した場合(*u*)と曇天空の場合(θ)との比較図である。例えば，$P=0.4$の位置で，採光面から下方0.5，2.0，5.0にある点での$U(\theta)_H/U_H$の値はそれぞれ，1.09，1.23，1.27で，受照点の位置が深いほど値は大となっている。また，円周外に受照点がある場合には，逆に$U(\theta)_H$はU_Hより小となる傾向があり，qが小さいほど$U(\theta)_H/U_H$の値は小さくなる。

図－4.13は鉛直面直接昼光率$U(\theta)_{V1}$の図で，横軸にPをとり，$q=$const.に対する$U(\theta)_{V1}$の曲線を示す。



図－4.13　水平円形光源による鉛直面直接昼光率$U(\theta)_{V1}$



図－4.14　水平円形光源

次に，受照点が図－4.14の点P_0のように，光源円周直下にある場合を考える。図－4.14の場合，式(4.1)～(4.3)の被積分関数の各要素を次のように書くことができる。

$\overline{P_1P_2}=2\rho\cos\phi$，$q=2q_0$とおいて，

$$\cos\theta_1=\frac{\cos\phi}{\sqrt{1-\sin^2\phi+q^2}}=\frac{1}{\sqrt{1+q_0^2}}\cdot\frac{\cos\phi}{\sqrt{1-\frac{1}{1+q_0^2}\cdot\sin^2\phi}}\quad\cdots\cdots\text{(a)}$$

$$\sin\theta_1=\frac{\overline{P_0P_1}}{\overline{P_0P_2}}=\frac{q_0}{\sqrt{1+q_0^2}}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-\frac{1}{1+q_0^2}\cdot\sin^2\phi}}\quad\cdots\cdots\text{(b)}$$

ここで，$1/(1+q_0^2)=k^2$，$q_0^2/(1+q_0^2)=k'^2$とおくと，$k^2+k'^2=1$であり，式(a)，(b)は次のようになる。

$$\cos\theta_1=k\frac{1}{\sqrt{1-k\sin^2\phi}},\qquad \sin\theta_1=k'\frac{1}{\sqrt{1-k\sin^2\phi}}\quad\cdots\cdots\text{(c)}$$

また，図－4.14から，$\theta_2=\pi/2$であるから

$$\cos\theta_2=0,\quad \sin\theta_2=0\quad\cdots\cdots\text{(d)}$$

これらを式(4.1)に代入して，

$$U(\theta)_H=\frac{100}{28\pi}\int_{\phi_1}^{\phi_2}\left[8\left\{1-\frac{k'^3}{(\sqrt{1-k^2\sin^2\phi})^3}\right\}+6\left(1-\frac{k'^2}{1-k^2\sin^2\phi}\right)\right]d\phi$$

$\phi_1=0$，$\phi_2=\pi/2$としての積分結果が$U(\theta)_H$の½の値を与えることから，

$$U(\theta)_H=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\pi/2}\left[-8\frac{k'^3}{(\sqrt{1-k^2\sin^2\phi})^3}-6\frac{k'^2}{1-k^2\sin^2\phi}+14\right]d\phi$$

また，

$$\frac{k'^2}{1-k^2\sin^2\phi}=1-\frac{k^2\cos^2\phi}{1-k^2\sin^2\phi}$$

の関係を用いて書き改めると，

$$U(\theta)_H=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\pi/2}\left[-8\cdot\frac{k'^3}{(\sqrt{1-k^2\sin^2\phi})^3}+6\cdot\frac{k^2\cos^2\phi}{1-k^2\sin^2\phi}+8\right]d\phi \quad \% \quad \cdots\cdots (4.16)$$

また，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$ なども同様にして，下記のようになる。

$$U(\theta)_{V1}=\frac{100}{14\pi}\int_0^{\pi/2}\left[8\cdot\frac{k^3\cos^3\phi}{(\sqrt{1-k^2\sin^2\phi})^3}-6\cdot\frac{kk'\cos\phi}{1-k^2\sin^2\phi}+6\cdot\left(\frac{\pi}{2}-\tan^{-1}\frac{q_0}{\cos\phi}\right)\right]\cdot\cos\phi d\phi \quad \% \quad (4.17)$$

$$U(\theta)_{V2}=\frac{100}{28\pi}\int_0^{\pi/2}\left[8\cdot\frac{k^3\cos^3\phi}{(\sqrt{1-k^2\sin^2\phi})^3}-6\cdot\frac{kk'\cos\phi}{1-k^2\sin^2\phi}+6\cdot\left(\frac{\pi}{2}-\tan^{-1}\frac{q_0}{\cos\phi}\right)\right]\cdot\sin\phi d\phi \quad \% \quad (4.18)$$

式（4.16）を次のように書きかえると，

$$U(\theta)_H=\frac{100}{14\pi}\left[-8k'^3\int_0^{\pi/2}\frac{1}{(\sqrt{1-k^2\sin^2\phi})^3}d\phi+6k^2\int_0^{\pi/2}\frac{\cos^2\phi}{1-k^2\sin^2\phi}d\phi+8\int_0^{\pi/2}d\phi\right]$$

$$=\frac{100}{14\pi}\left\{-8k'^3[I_1]_0^{\pi/2}+6k^2[I_2]_0^{\pi/2}+8[I_3]_0^{\pi/2}\right\} \quad \cdots\cdots (4.19)$$

定積分 $[I_1]_0^{\pi/2}$，$[I_2]_0^{\pi/2}$，$[I_3]_0^{\pi/2}$ は次のようになる。

$$[I_1]_0^{\pi/2}=\frac{1}{k'^2}\int_0^{\pi/2}\sqrt{1-k^2\sin^2\phi}\,d\phi \quad \cdots\cdots (a)$$

$$[I_2]_0^{\pi/2}=\frac{\pi}{2}(1-k')\frac{1}{k^2} \quad \cdots\cdots (b)$$

$$[I_3]_0^{\pi/2}=\frac{\pi}{2} \quad \cdots\cdots (c)$$

以上の式(a)，(b)，(c)を式（4.19）に代入して，次式が得られる。

$$U(\theta)_H=\frac{100}{14\pi}\left\{-8k'E(k)+6(1-k')\cdot\frac{\pi}{2}+4\pi\right\}$$

$$=\frac{100}{14\pi}\left\{7\pi-k'(8\cdot E(k)+3\pi)\right\} \quad \% \quad \cdots\cdots (4.20)$$

ただし，

$$E(k)=\int_0^{\pi/2}\sqrt{1-k^2\sin^2\phi}\,d\phi$$

式（4.17）を次のように書く。

$$U(\theta)_{V1}=\frac{100}{14\pi}\left\{8k^3\int_0^{\pi/2}\frac{\cos^4\phi}{(\sqrt{1-k^2\sin^2\phi})^3}d\phi-6kk'\int_0^{\pi/2}\frac{\cos^2\phi}{1-k^2\sin^2\phi}d\phi\right.$$
$$\left.-6\int_0^{\pi/2}\cos\phi\cdot\tan^{-1}\frac{q_0}{\cos\phi}d\phi+3\pi\int_0^{\pi/2}\cos\phi d\phi\right\}$$
$$=\frac{100}{14\pi}\left\{8k^3[I_1]_0^{\pi/2}-6kk'[I_2]_0^{\pi/2}-6[I_3]_0^{\pi/2}+3\pi[I_4]_0^{\pi/2}\right\}\quad\% \quad\cdots\cdots(4.21)$$

定積分 $[I_1]_0^{\pi/2}\sim[I_4]_0^{\pi/2}$ は次のようになる。

$$[I_1]_0^{\pi/2}=\frac{1+k'^2}{k^4}\cdot E(k)-2\cdot\frac{k'^2}{k^4}\cdot F(k)\quad\cdots\cdots(a)$$

ただし，$E(k)=\int_0^{\pi/2}\sqrt{1-k^2\sin^2\phi}d\phi$, $F(k)=\int_0^{\pi/2}\frac{1}{\sqrt{1-k^2\sin^2\phi}}d\phi$

であり，それぞれ Legendre－Jacobi の第２種，第１種の完全楕円積分を表わす。

$$[I_2]_0^{\pi/2}=\frac{\pi}{2}\cdot\frac{1}{k^2}(1-k')\quad\cdots\cdots(b)$$

$$[I_3]_0^{\pi/2}=\frac{\pi}{2}\left\{1+\frac{k'-1}{k}\right\}\quad\cdots\cdots(c)$$

$$[I_4]_0^{\pi/2}=1\quad\cdots\cdots(d)$$

以上の(a)～(d)を式（4.21）に代入して $U(\theta)_{V1}$ が得られる。

$$U(\theta)_{V1}=\frac{100}{14\pi}\left[8\left\{\frac{1+k'^2}{k}E(k)-2\frac{k'^2}{k}F(k)\right\}-3\pi\left\{\frac{k'(1-k')}{k}\right\}-3\pi\left(1+\frac{k'-1}{k}\right)+3\pi\right]$$
$$=\frac{100}{14\pi}\left[8\left\{\frac{1+k'^2}{k}E(k)-2\frac{k'^2}{k}F(k)\right\}+3\pi\cdot\frac{(k'-1)^2}{k}\right]\quad\% \quad\cdots\cdots(4.22)$$

式（4.18）を次のように書き改める。

$$U(\theta)_{V2}=\frac{100}{28\pi}\left\{8k^3\int_0^{\pi/2}\frac{\sin\phi\cos^3\phi}{(\sqrt{1-k^2\sin^2\phi})^3}d\phi-6kk'\int_0^{\pi/2}\frac{\sin\phi\cos\phi}{1-k^2\sin^2\phi}d\phi\right.$$

$$\left.-6\int_0^{\pi/2}\sin\phi\tan^{-1}\frac{q_0}{\cos\phi}d\phi+3\pi\int_0^{\pi/2}\sin\phi d\phi\right\}$$

$$=\frac{100}{28\pi}\left\{8k^3[I_1]_0^{\pi/2}-6kk'[I_2]_0^{\pi/2}-6[I_3]_0^{\pi/2}+3\pi[I_4]_0^{\pi/2}\right\}\ \%\quad\cdots\cdots(4.23)$$

定積分 $[I_1]_0^{\pi/2}\sim[I_4]_0^{\pi/2}$ は次のようになる。

$$[I_1]_0^{\pi/2}=\frac{(1-k')^2}{k^4}\quad\cdots\cdots(a)$$

$$[I_2]_0^{\pi/2}=-\frac{1}{k^2}\log k'\quad\cdots\cdots(b)$$

$$[I_3]_0^{\pi/2}=\sin^{-1}(k')-\frac{k'}{k}\log(k')\quad\cdots\cdots(c)$$

$$[I_4]_0^{\pi/2}=1\quad\cdots\cdots(d)$$

以上の(a)～(d)を式（4.23）に代入すると，

$$U(\theta)_{V2}=\frac{100}{28\pi}\left[8\cdot\frac{(1-k')^2}{k}+6\cdot\frac{k'}{k}\log(k')-6\sin^{-1}(k')+6\cdot\frac{k'}{k}\log(k')+3\pi\right]$$

$$=\frac{100}{28\pi}\left[8\cdot\frac{(1-k')^2}{k}+12\cdot\frac{k'}{k}\log(k')-6\cdot\tan^{-1}\left(\frac{k'}{k}\right)+3\pi\right]\ \%\quad\cdots\cdots(4.24)$$

以上，式（4.20）（4.22）（4.24）のように，$P=\rho$ すなわち，受照点 P が光源円の円周直下にある場合には，$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$ は初等関数では表わされないことが明らかであり，一般の位置に対しての $U(\theta)$ の積分が困難であることが，これから推察することができる。

以上に求めた$P=\rho$の場合の各式を一括して次に示す。

$$U(\theta)_H=\frac{100}{14\pi}[7\pi-k'\{8E(k)+3\pi\}]\quad\% \qquad (4.20)$$

$$U(\theta)_{V1}=\frac{100}{14\pi}\left[8\left\{\frac{1+k'^2}{k}E(k)-2\frac{k'^2}{k}F(k)\right\}+3\pi\cdot\frac{(k'-1)^2}{k}\right]\quad\% \qquad (4.22)$$

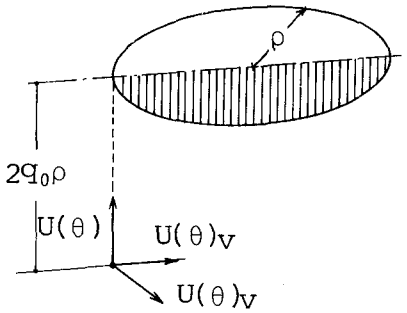
$$U(\theta)_{V2}=\frac{100}{28\pi}\left[8\frac{(1-k')^2}{k}+12\frac{k'}{k}\log(k')-6\tan^{-1}\left(\frac{k'}{k}\right)+3\pi\right]\quad\% \qquad (4.24)$$

$$k=\frac{1}{\sqrt{1+q_0^2}},\qquad k'=\frac{q_0}{\sqrt{1+q_0^2}}$$

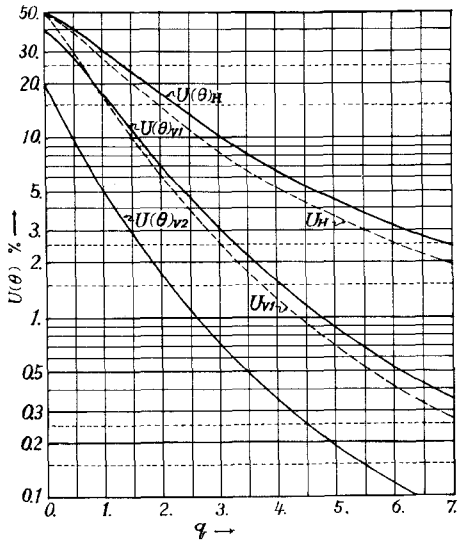
但し，q_0は図－4.15のようである。

$U(\theta)_{V2}$は斜線部による値である。

図－4.16は以上の$U(\theta)_H$, $U(\theta)_{V1}$, $U(\theta)_{V2}$の値を$q=2q_0$に対して示すもので，図中の点線は均一輝度を仮定した場合の直接昼光率U_H, U_{V1}の値を示す。



図－4.15



図－4.16　水平円形光源による直接昼光率
（受照点が円周直下にある場合）

4.5　第4章のまとめ

本章では鉛直円形光源，水平円形光源などによる直接昼光率の算定について，若干の考察を行った。円形光源は矩形光源ほど一般的ではないが，円形中庭に面する外壁面上の点，中庭内部の点などに対しては，円形光源による直接昼光率は正確に適用することができる。この章で円形光源に関する基本式について積分し得たのは，鉛直半円形光源の中心軸上に受照点がある場合と，水平円形光源の円周直下に受照点がある場合である。その他については，直線形態を有する光源の場合に比較すると，積分が困難となるため数値積分を行い，計算図表を作成した。

参考文献

1) 小島武男・比嘉俊太郎・西安男・鵜飼正保：鉛直円形光源による直接照度（ＣＩＥ標準曇天空の場合），水平面照度，日本建築学会東海支部研究報告集，第6号，昭和43年6月

2) 小島武男・比嘉俊太郎・岡本俊二・田村栄一：鉛直円形光源による直接照度〔水平面照度〕その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和45年9月

3) 小島武男・比嘉俊太郎・鵜飼正保・西安男：水平円形光源による直接照度（ＣＩＥ標準曇天空の場合）〔1〕水平面照度，日本建築学会論文報告集，号外，昭和42年10月

4) 小島武男・比嘉俊太郎・鵜飼正保・西安男：水平円形光源による直接照度（ＣＩＥ標準曇天空の場合）〔2〕鉛直面照度，日本建築学会論文報告集，号外，昭和42年10月

5) 小島武男・比嘉俊太郎・鵜飼正保・西安男：水平円形光源による直接照度（ＣＩＥ標準曇天空の場合）〔3〕　日本建築学会論文報告集，号外，昭和42年10月

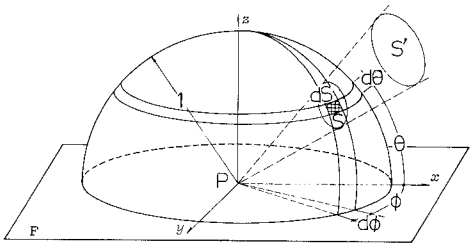
6) 小島武男・比嘉俊太郎・西安男：鉛直円形光源による直接照度（ＣＩＥ標準曇天空の場合），〔鉛直面照度〕，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和43年10月

5. 任意形態の光源による直接昼光率の図式解法

5.1 均一輝度天空の場合 [1)]

5.1.1 立体角投射の法則

図－5.1に示すように，任意の形態S'をもち，その輝度がLである完全拡散性の光源面（以後，完全拡散面と呼ぶことにする。）を受照面F上の1点Pを中心とする単位球面上にPを極として射影した結果をSとする。P点のS'による直接照度はSがS'と同一の輝度分布をもつ完全拡散面として計算したものと同一である。



図－5.1

S内の微小面積をdSとすると，P点の照度は次の手順で求められる。

a) dSのP方向の光度…… $LdS=L\cdot\cos\theta\cdot d\phi\cdot d\theta$

b) P点の直接法線照度 …… $LdS=L\cdot\cos\theta\cdot d\phi\cdot d\theta$

c) P点におけるF面の直接照度…… $LdS\sin\theta=L\sin\theta\cos\theta\cdot d\theta\cdot d\phi$

上記の結果はdSを高度がθ，$\theta+d\theta$の両高度円と，方位角がϕ，$\phi+d\phi$の両方位円とに囲まれる部分とすると，それぞれ右辺に記したようになる。故に，c)を下記のように書くと，S'によるF面のP点における直接照度Eは(5.1)式となる。

$$dE=L\sin\theta\cos\theta\,d\theta\,d\phi$$

$$E=\int_S L\sin\theta\cos\theta\,d\theta\,d\phi \quad\cdots\cdots(5.1)$$

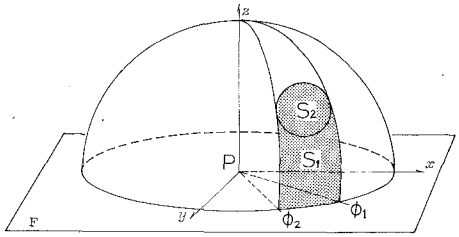
LがSの全域にわたって一定ならば，Sの高度に関する上限，下限をそれぞれθ_2，θ_1として，

$$E=L\int_S \sin\theta\cos\theta\,d\theta\,d\phi=\frac{L}{2}\int\left(-\frac{1}{2}\right)[\cos 2\theta]_{\theta_1}^{\theta_2}\,d\phi \quad\cdots\cdots(5.2)$$

(5.2)式のθ_1，θ_2は一般にはϕの関数である。いま，$\theta_1=0$とするとEは(5.3)式で与えられる。

$$E=\frac{L}{4}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[1-\cos 2\theta_2]d\phi \quad \cdots\cdots (5.3)$$

これは図－5.2の（S_1+S_2）を光源と考えた場合に，求めるS_2による照度は(S_1+S_2)による照度からS_1による照度を差引いたものである。方位ϕに関するS_2, S_1の高度の上限をそれぞれθ_{21}，θ_{11}とすると，上述のことは下記（5.4）式で表わされる。



図－5.2

$$E=\frac{L}{4}\left[\int_{\phi_1}^{\phi_2}\{1-\cos 2\theta_{21}\}d\phi-\int_{\phi_1}^{\phi_2}\{1-\cos 2\theta_{11}\}d\phi\right]=\frac{L}{4}\int_{\phi_1}^{\phi_2}\{\cos 2\theta_{11}-\cos 2\theta_{21}\}d\phi \quad (5.4)$$

P点に与えうる球面部分全体による直接照度E'_S（以下，全天空照度と呼ぶことにする。）は，（5.3）式において，$\theta_2=\pi/2$，$\phi_1=0$，$\phi_2=2\pi$として求められ，その値は$E'_S=\pi L$である。

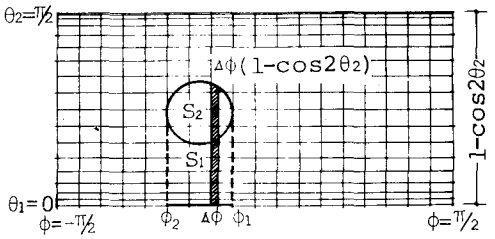
S_2によるF面のP点における直接照度と全天空照度との比は直接昼光率または立体角投射率といわれるもので，これをUで表わすと，次のようになる。

$$U=\frac{E}{E'_S}=\left[\frac{L}{4}\int_{\phi_1}^{\phi_2}(1-\cos 2\theta_2)d\phi\right]\Big/\pi L=\frac{1}{4\pi}\int_{\phi_1}^{\phi_2}(1-\cos 2\theta_2)d\phi \quad \cdots\cdots (5.5)$$

ここで図－5.3の場合を考える。同図の斜線部の面積は$[1-\cos 2\theta_2]\triangle\phi$で，$\phi_2\sim\phi_1$を等歩度$\triangle\phi$に割ってあれば，下記のようになる。

$$\lim_{\Delta\phi\to 0\,(\phi_1-\phi_2)}\sum(1-\cos 2\theta_2)\Delta\phi=\int_{\phi_1}^{\phi_2}(1-\cos 2\theta_2)d\phi$$

従って，図－5.3で（S_1+S_2）部の面積を求め，その値を（Sa_1+Sa_2）とすると，（5.5）式は



図－5.3　ワルドラム図

$$U=\frac{1}{4\pi}(Sa_1+Sa_2)$$

となる。一方，$\phi=-\pi/2\sim\pi/2$ 部分の面積は全天空照度の½に相当し，その面積は図－5.3から 2π であるから，(5.5) 式はさらに次式のように書き改められる。

$$U=(Sa_1+Sa_2)/2\left[ABCD\text{の面積}\right] \cdots\cdots (5.6)$$

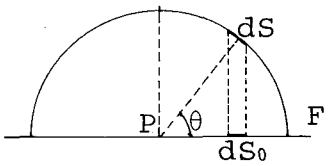
図－5.3 を Waldram の図とよぶ。このような図上に (S_1+S_2) の輪郭をプロットすることにより U が求められ，$\pi L\times U$ から直接照度が求められる。U は普通には百分率で表示される。その場合，(5.6) 式は下記のように書かれる。

$$U=\left\{(Sa_1+Sa_2)/2\left[ABCD\text{の面積}\right]\right\}\times 100\ (\%) \cdots\cdots (5.7)$$

次に，前述の c) 式から，微小光源部分 dS による F 面上の P 点の直接照度は $dE=LdS\sin\theta$ であり，従って，S 全体による照度 E は，

$$E=\int_S L\sin\theta\, dS$$

である。前述のように，L が S の全域にわたって一定ならば，図－5.4 を参照して



図－5.4

$$E=L\int_S \sin\theta\, dS$$

$$=L\int_S dS_0=LS_0 \cdots\cdots (5.8)$$

すなわち，単位球面上に投影された光源の受照面への正射影面積を S_0 とするとき，LS_0 が P 点の直接照度である。前のように U を考える場合には，これを πL で割って下記のように書く。

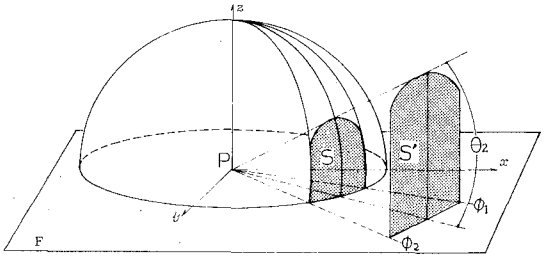
$$U=(S_0/\pi)\times 100\ (\%) \cdots\cdots (5.9$$

以上を立体角投射の法則といい，U を立体角投射率または直接昼光率と呼ぶ。U は照明における物理学的な要素から独立して考えられる無次元数である。

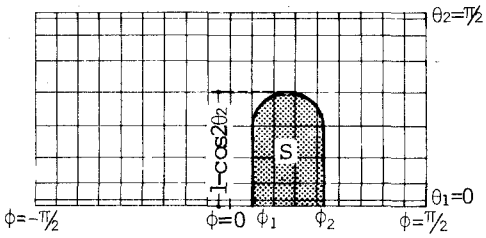
5.1.2 ワルドラム図

図－5.5 はワルドラム図上に光源 S の輪郭を描く方法を示す。この作図は S のプロットを精密に行おうとする場合には，S が長方形のような単純な形態であっても，やや煩雑になる。

ここでは，光源Sをワルドラム図上にプロットする作業を簡便化するために，予めワルドラム図上に引いておく補助曲線について考える。直線AB上のP点からの直視点をO_0とし，この方向を$\phi=0$とする。これからϕ方向にあるAB上の点をO_ϕで表わし，O_0，O_ϕのF面上の高度をそれぞれθ_0，θ_ϕと書くことにすると，O_0，O_ϕはワルドラム図上では図－5.6 (b) のようにプロットされることになる。予め種々のθ_0に対して，ϕの変化に伴なうO_ϕの軌跡をワルドラム図上に記入しておき，これに従ってS_0の輪郭を作図することにすれば，作業は著しく簡便化される。

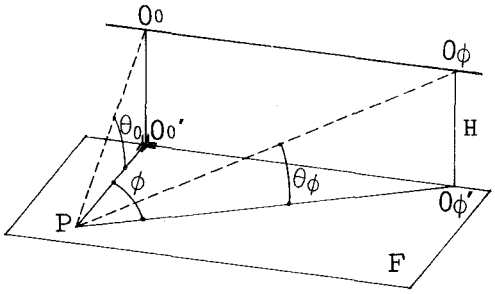


(a)

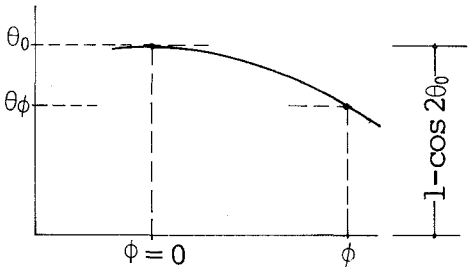


(b)

図－5.5　ワルドラム図



(a)



(b)

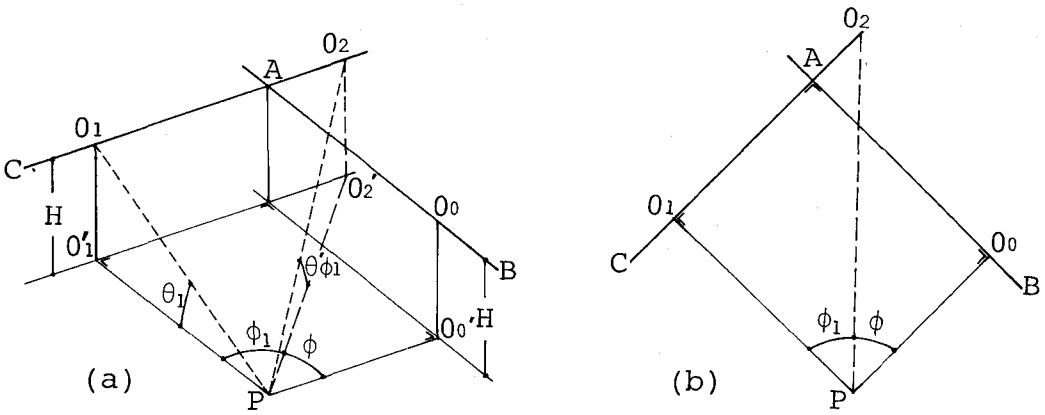
図－5.6

図－5.6 (a)を参照して，

$\tan\theta_\phi=\overline{O_\phi O'_\phi}/\overline{PO'_\phi}=H/(\overline{PO'_0}\ \sec\phi)$，$\overline{PO'_0}=H\cdot\cot\theta_0$ であるから，

$$1-\cos 2\theta_\phi=\frac{2\sin^2\theta_0\cos^2\phi}{\cos^2\theta_0+\sin^2\theta_0\cos^2\phi} \quad \cdots\cdots (5.10)$$

式 (5.10) で $\theta_0 = \pi/2$, $\phi = 0$ とすると，$\left[1 - \cos 2\theta_\phi\right] = 2$ である。



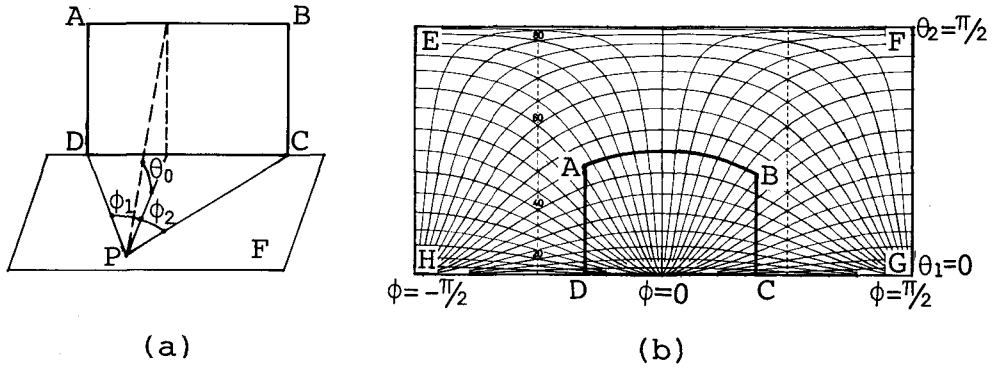
図－5.7

図－5.7(a)の直線 AB に直角な直線 AC に対して，直視高度を θ_1，直視点から ϕ_1 の方位にある AC 上の点 O_2 の高度を $\theta'_{\phi 1}$ とすると，(5.10) 式と同様の式が成り立つ。

$$1-\cos 2\theta'_{\phi_1} = \frac{2\sin^2\theta_1\cos^2\phi_1}{\cos^2\theta_1+\sin^2\theta_1\cos^2\phi_1}$$

ここで，図－5.7(b)を参照して，$\phi_1 = \pi/2 - \phi$ であるから，上式は下記のようになる。

$$1-\cos 2\theta'_{\phi_1} = \frac{2\sin^2\theta_1\sin^2\phi}{\cos^2\theta_1+\sin^2\theta_1\sin^2\phi} \quad \cdots\cdots (5.11)$$



図－5.8　ワルドラム図

この式で $\phi = 0$，$\theta_1 = \pi/2$ とすると，右辺は 0 となる。全体として θ_0 , θ_1 の種々の値に

対して図－5.8(b)のような曲線群が得られる。この図上に光源の形を図中の$ABCD$のように描き込み，その面積を$F(ABCD)$，ワルドラム図の全面積を$F(EFGH)$とするとき，直接昼光率Uは

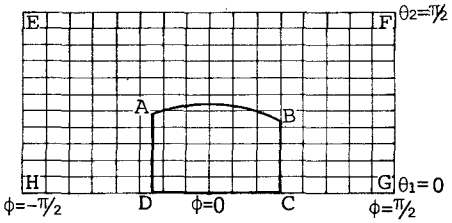
$$U=\frac{F(ABCD)}{2F(EFGH)}\times 100 \quad (\%)$$

となる。ここで面積$F(EFGH)$は容易に求められるが，面積$F(ABCD)$は長方形などのように簡単に求められるものではないから，面積$F(ABCD)$を精密に求めることは困難であるが，面積$EFGH$をEF, FGに平行な直線によって等面積の長方形に区画し，面積$F(ABCD)$内に含まれる区画数を数えることによって略算することができる。

例えば，EFをx個，FGをy個に分割し，$F(ABCD)$内にそのp個が含まれるとすれば，

$$U=\frac{p}{2xy}\times 100 \quad (\%)$$

によって光源$ABCD$のP点におけるUを求めることができる(図－5.9)。



図－5.9　ワルドラム図

5.1.3　立体角投射図

式(5.9)のS_0をSまたはS'の立体角投射図という。S_0の輪郭を描き，その面積を求めると，単位球面の場合の立体角投射率Uは

$$U=(S_0/\pi)\times 100 \quad (\%)$$

である。S_0の図もワルドラム図の場合と同様，その作図はやや煩雑であり，その面積を求めることは容易とはいえない。この場合も簡単にUの略算を行うには，全天の射影である単位円を半径および同心円によって等面積に区画する。立体角投射の法則によって，この1区画は等しい立体角投射率（または直接昼光率）Uに相当する。このような図上にS_0を描き，その中に含まれる区画数を数えることによって，Uを略算することができる。例えば，半径によってx個，同心円によってy個に単位円が区画されており，S_0内にそのp個の区画が含まれているとすれば，S_0に対応するSまたはS'によってP点に生ずる立体角投射率Uは

$$U=(p/xy)\times 100 \quad (\%)$$

となる。

単位円を等面積に分割するには，円周方向では角を等分し，半径方向では次のように分割すればよい。

$$\pi r_1^2 = \pi r_2^2 - \pi r_1^2 = \pi r_3^2 - \pi r_2^2 = \cdots\cdots = \pi r_y^2 - \pi r_{y-1}^2$$

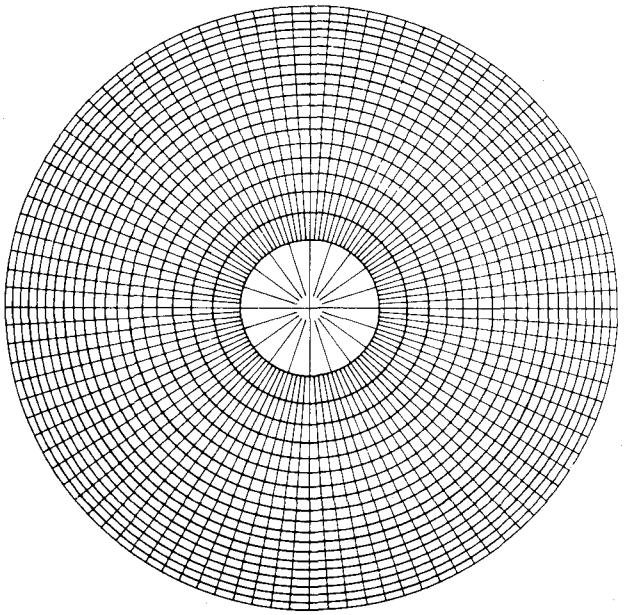
従って，　$r_2^2 = 2r_1^2$ ，$r_3^2 = 3r_1^2, \cdots\cdots, r_y^2 = y\,r_1^2$

最後 y 番目の円は単位円であるから，$r_y^2 = y\,r_1^2 = 1$。この区画により単位円は y 個の等面積に分割され，各分割円の半径は，

$$r_1 = 1\Big/\sqrt{y},\quad r_2 = \sqrt{2}\Big/\sqrt{y},\ \cdots, r_n = \sqrt{n}\Big/\sqrt{y},\ \cdots, r_y = 1$$

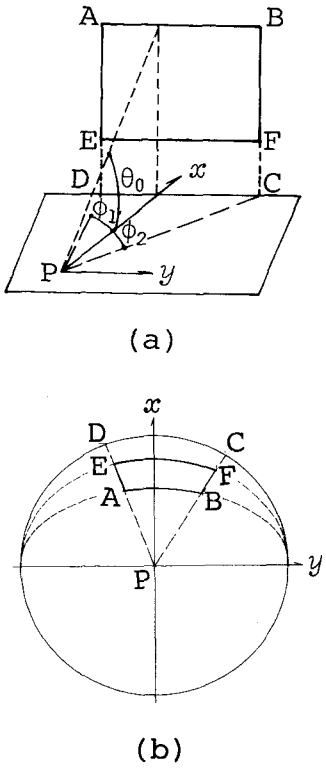
となる。

図－5.10 は上式において，$y = 20$ とし，円周を 100 等分（$x = 100$）した場合の立体角投射図である。従って，この図の 1 区画は 0.05% に相当する。

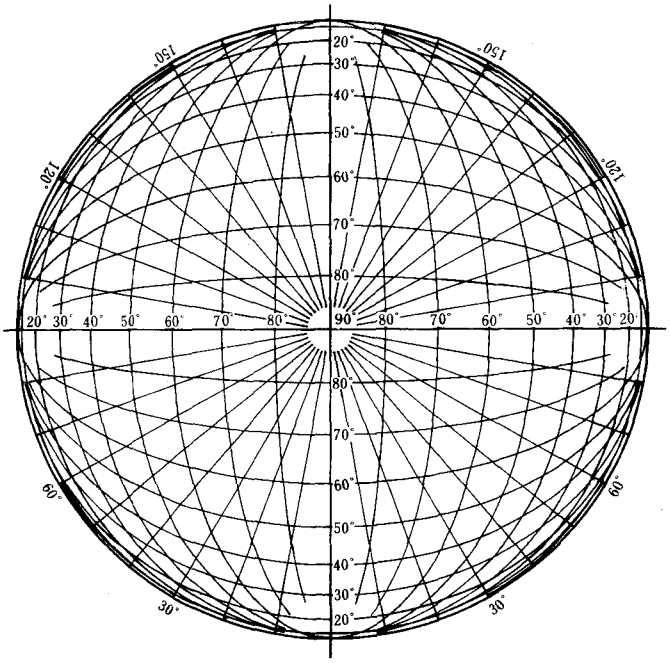


図－5.10　直接昼光率算定図（1区画0.05%）

図－5.1 の S' が図－5.11(a) のような長方形である場合には，光源の上辺 AB 及び下辺 EF は楕円の一部となる。従って，種々の直視高度 θ_0 をもつ水平線と，種々の方位をもつ鉛直線の立体角投射図（これは単位球面上にそれらを投射して得る球面上の形態の正投象である。）を描いておくと，ワルドラム図の場合と同様に，作図の際に便利である。図－5.12 はそのような直線の射影図を示す。



図－5.11



図－5.12　水平線の正射影図

5.2　曇天空輝度分布の場合[2)～6)]

5.2.1　概　　説

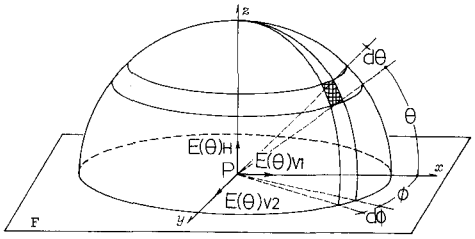
これまで天空は一様な輝度分布をもっものとして取扱ってきたが，近来，Moon & Spencer が曇天時の天空輝度分布は天頂部の輝度を L_Z とし，高度 θ の天空部分の輝度を L_θ と書くことにすれば，

$$L_\theta = L_Z\,(1 + 2\sin\theta)/3$$

で表わされるとし，国際照明委員会もこれを採択している。ここではこのような輝度分布を仮定する場合のワルドラム図と直接昼光率算定図について考える。前節まで考えてきた作図解法は，天空輝度分布が一様と仮定される限り受照面の位置に制限はなかった。ワルドラム図にしても立体角投射率図にしても，また受照面が水平面であっても，傾斜面であっても，それに従う光源の輪郭をその上に書き重ねれば，立体角投射率（直接昼

光率）Uの計算は同様に行うことができた。しかし，天空輝度分布が一様でないと，上述のことはもはや成り立たなくなり，受照面の位置に従って別々の図を考えねばならなくなる。

図－5.13 で受照面を水平面と考えて，CIE曇天空と同じ輝度分布をもつ光源面によるP点の水平面直接照度を$E(\theta)_H$，x方向に垂直な鉛直面直接照度を$E(\theta)_{V1}$，y方向に垂直な鉛直面直接照度を$E(\theta)_{V2}$とすると，それらは図を参照して，次式のように書くことができる。



図－5.13

$$E(\theta)_H=\int_\phi d\phi\int_\theta L_\theta\cdot\sin\theta\cos\theta\,d\theta \quad\cdots\cdots (5.12a)$$

$$E(\theta)_{V1}=\int_\phi\cos\phi\,d\phi\int_\theta L_\theta\cdot\cos^2\theta\,d\theta \quad\cdots\cdots (5.12b)$$

$$E(\theta)_{V2}=\int_\phi\sin\phi\,d\phi\int_\theta L_\theta\cdot\cos^2\theta\,d\theta \quad\cdots\cdots (5.12c)$$

$$L_\theta=L_Z(1+2\sin\theta)/3,\quad L_Z=\text{天頂輝度},\quad \theta=\text{高度} \quad\cdots\cdots (5.13)$$

ϕ，θが互いに独立の場合には，(5.13) 式を (5.12a) ～ (5.12c) 式に代入してθの積分を遂行すると下記の式 (5.14a) ～ (5.14c) のようになる。

$$E(\theta)_H=\frac{L_Z}{36}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[8\sin^3\theta+6\sin^2\theta-3]_{\theta_1}^{\theta_2}d\phi \quad\cdots\cdots (5.14a)$$

$$E(\theta)_{V1}=\frac{L_Z}{36}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[-8\cos^3\theta+6\sin\theta\cos\theta+6\theta]_{\theta_1}^{\theta_2}\cos\phi d\phi \quad\cdots\cdots (5.14b)$$

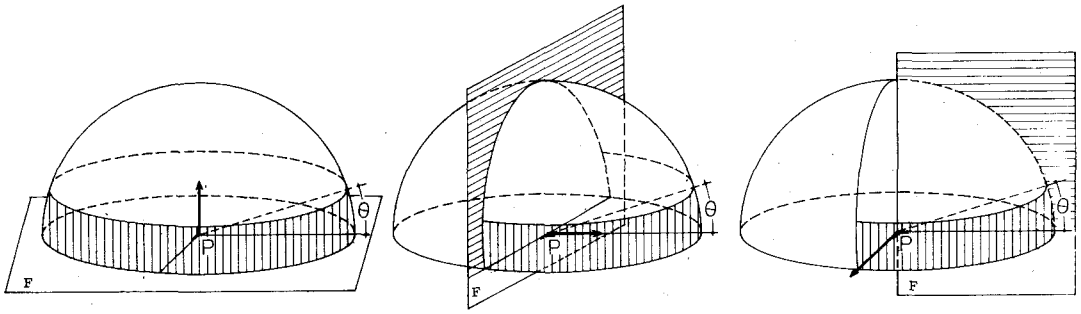
$$E(\theta)_{V2}=\frac{L_Z}{36}\int_{\phi_1}^{\phi_2}[-8\cos^3\theta+6\sin\theta\cos\theta+6\theta]_{\theta_1}^{\theta_2}\sin\phi d\phi \quad\cdots\cdots (5.15c)$$

式 (5.14a) において，$\theta_1=0$，$\theta_2=\pi/2$；$\phi_1=0$，$\phi_2=2\pi$とすると，全天による水平面照度として下記のE_Sが得られる。

$$E_S=7\pi L_Z/9 \quad\cdots\cdots (5.15)$$

次に，図－5.14 のような斜線帯による直接照度 (5.14a) ～ (5.14c) 式によって求めると

下記のようである。



$\theta_1=0,\ \theta_2=\theta$
$\phi_1=0,\ \phi_2=\phi\leqq 2\pi$
(5.14a)

$\theta_1=0,\ \theta_2=\theta$
$\phi_1=0,\ \phi_2=\phi\leqq \pi$
(5.14b)

$\theta_1=0,\ \theta_2=\theta$
$\phi_1=0,\ \phi_2=\phi\leqq \pi/2$
(5.14c)

図－5.14

$$E(\theta)_H=\frac{L_Z}{36}[8\sin^3\theta+6\sin^2\theta]\phi \quad \cdots\cdots (5.16a)$$

$$E(\theta)_{V1}=\frac{L_Z}{36}[8(1-\cos^3\theta)+6(\sin\theta\cos\theta+\theta)]\sin\phi \quad \cdots\cdots (5.16b)$$

$$E(\theta)_{V2}=\frac{L_Z}{36}[8(1-\cos^3\theta)+6(\sin\theta\cos\theta+\theta)](1-\cos\phi) \quad \cdots\cdots (5.16c)$$

(5.15)式の E_S に対する(5.16a)～(5.16c)の各式の値を，(CIE曇天空による)直接昼光率または立体角投射率と呼ぶこととし，それらを $U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$ などと書き表わせば下記のようになる。

$$\left.\begin{aligned} &U(\theta)_H=(100/28\pi)\cdot Y_H\cdot X_H,\ \% \\ &\quad X_H=\phi,\ Y_H=8\sin^3\theta+6\sin^2\theta \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (5.17a)$$

$$\left.\begin{aligned} &U(\theta)_{V1}=(100/28\pi)\cdot Y_V\cdot X_{V1} \\ &\quad X_{V1}=\sin\phi,\ Y_V=8(1-\cos^3\theta)+6(\sin\theta\cos\theta+\theta) \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (5.17b)$$

$$\left.\begin{aligned} &U(\theta)_{V2}=(100/28\pi)\cdot Y_V\cdot X_{V2} \\ &\quad X_{V2}=1-\cos\phi,\ Y_V=8(1-\cos^3\theta)+6(\sin\theta\cos\theta+\theta) \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (5.17c)$$

上式から，$Y_H\cdot X_H$，$Y_V\cdot X_{V1}$，$Y_V\cdot X_{V2}$ はそれぞれ $U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$ に比例する面積を意味すると考えることができる。

5.2.2 ワルドラム図

前述のことから，直交座標軸の x 軸上に X (X_H, X_{V1} または X_{V2}) をとり，y 軸上に X に対応する Y (Y_H, Y_V) をとった平面分を考えると，その面積は $U(\theta)_H$, $U(\theta)_{V1}$ または $U(\theta)_{V2}$ に比例する。故に，この面上に X, Y を測度として光源の図形を描き，その面積を測れば直接昼光率に比例する数値が得られる。式(5.16a)～(5.16c)において，$\theta=\pi/2$, $\phi=\pi/2$ とすると，光源は $1/4$ 天空に相当し，それらによる直接昼光率 $U(\theta)_{HS}$, $U(\theta)_{V1S}$, $U(\theta)_{V2S}$ はそれぞれ

$$U(\theta)_{HS}=(100/28\pi)\cdot(14)\cdot(\pi/2)=25\ \%$$

$$U(\theta)_{V1S}=U(\theta)_{V2S}=(100/28\pi)(8+3\pi)\fallingdotseq 19.809\ \%$$

であり，この場合の X, Y を X_{HS}, X_{V1S}, X_{V2S} ; Y_{HS}, Y_{VS} とすると，

$$X_{HS}=\pi/2(=90^\circ),\ Y_{HS}=14,\ X_{V1S}=X_{V2S}=1,\ Y_{VS}=8+3\pi\fallingdotseq 17.425$$

であり，X, Y の相対応するものの積である長方形の面積が25％ ($U(\theta)_H$)，19.809％ ($U(\theta)_{V1}$, $U(\theta)_{V2}$) に対応するものであるから，各図面上の光源図形の面積をそれぞれ $A(\theta)_H$, $A(\theta)_{V1}$, $A(\theta)_{V2}$ とすると，$U(\theta)_H$, $U(\theta)_{V1}$, $U(\theta)_{V2}$ は式(5.18a)～(5.18c)によって与えられる。

$$U(\theta)_H=\{A(\theta)_H/X_{HS}\cdot Y_{HS}\}\cdot 25\ \% \quad\cdots\cdots(5.18a)$$

$$U(\theta)_{V1}=\{A(\theta)_{V1}/X_{V1S}\cdot Y_{VS}\}\cdot 19.809\ \% \quad\cdots\cdots(5.18b)$$

$$U(\theta)_{V2}=\{A(\theta)_{V2}/X_{V2S}\cdot Y_{VS}\}\cdot 19.809\ \% \quad\cdots\cdots(5.18c)$$

$A(\theta)_H$, $A(\theta)_{V1}$ または $A(\theta)_{V2}$ を測るのにプラニメータを使用することを避けたい場合には，X_{HS}, X_{V1S} または X_{V2S} を m 等分，Y_{HS}, Y_{VS} を n 等分して図面上に等面積の $m\cdot n$ 個の枡目を作り，$A(\theta)_H$, $A(\theta)_{V1}$ または $A(\theta)_{V2}$ に含まれる枡目の数 P_H, P_{V1} または P_{V2} を数えればよい。この場合には下記の(5.19a)～(5.19c)式によって直接昼光率が求められる。

$$U(\theta)_H=(P_H/m\cdot n)\cdot 25\ \% \quad\cdots\cdots(5.19a)$$

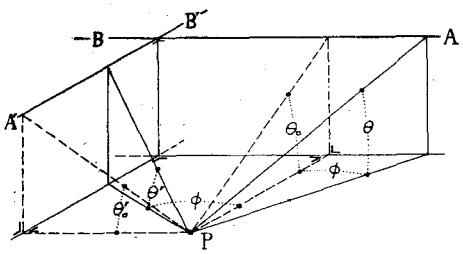
$$U(\theta)_{V1}=(P_{V1}/m\cdot n)\cdot 19.809\ \% \quad\cdots\cdots(5.19b)$$

$$U(\theta)_{V2}=(P_{V2}/m\cdot n)\cdot 19.809\ \% \quad\cdots\cdots(5.19c)$$

$m=25$, $n=20$ とすると，1枡に対応する直接昼光率は(5.19a)に対して0.05％，式(5.19b, c)に対しては約0.04％である。

上記のように構成される直接昼光率計算図上に光源図形を描く場合には，既述のように $U(\theta)_H$ に関しては X_H, Y_H ; $U(\theta)_{V1}$ に関しては X_{V1}, Y_V ; $U(\theta)_{V2}$ に関しては X_{V2}, Y_V を測度とする。この場合，一般には Y に含まれる θ は ϕ の関数で示される。光源が水平

な2辺をもつ鉛直長方形の場合は，鉛直辺は計算図上でϕ＝一定のy軸に平行な線分として描かれ水平な辺はこれを含む直視高度θ_0の全直線の図形の一部となる。従って，種々の直視高度をもつ水平線の図形を書き入れておけば便利である。図－5.15を参照して，直線$AB, A'B'$各部の高度θ，θ'はそれぞれ次式のように表わされる。



図－5.15

$$AB: \qquad \sin\theta=\frac{\sin\theta_0\cdot\cos\phi}{\sqrt{\cos^2\theta_0+\cos^2\phi\cdot\sin^2\theta_0}}$$

$$A'B': \qquad \sin\theta'=\frac{\sin\theta'_0\cdot\sin\phi}{\sqrt{\cos\theta'_0+\sin^2\phi\cdot\sin^2\theta'_0}}$$

これらを(5.17a)～(5.17c)に代入することにより，Y_H, Y_Vを計算することができる。表－5.1(a), (b)はX_{V1}，X_{V2}とともに上記のようにして求めたY_H，Y_Vの値を図－5.15のABについて示したものである。$A'B'$の図形は$\phi=\pi/4$に関してABの図形と対称であるから，その図形も表－5.1を利用して描くことができる。

図－5.16，図－5.17，図－5.18はそれぞれ$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$の計算図を示す。それらは表－5.1を利用して図－5.15のAB（実曲線），$A'B'$（破曲線）を書き入れたもので，下辺にϕを指示し，上辺に$m=25$，左右辺に$n=20$の等分目盛を記入してある。従って，これらによって各図面上に枡目を作ると，1枡目は図－5.16で0.05％，図－5.17及び図－5.18で0.04％の直接昼光率にあたる。AB，$A'B'$直線に関する直視高度θ_0は各曲線に度数で注記してある。

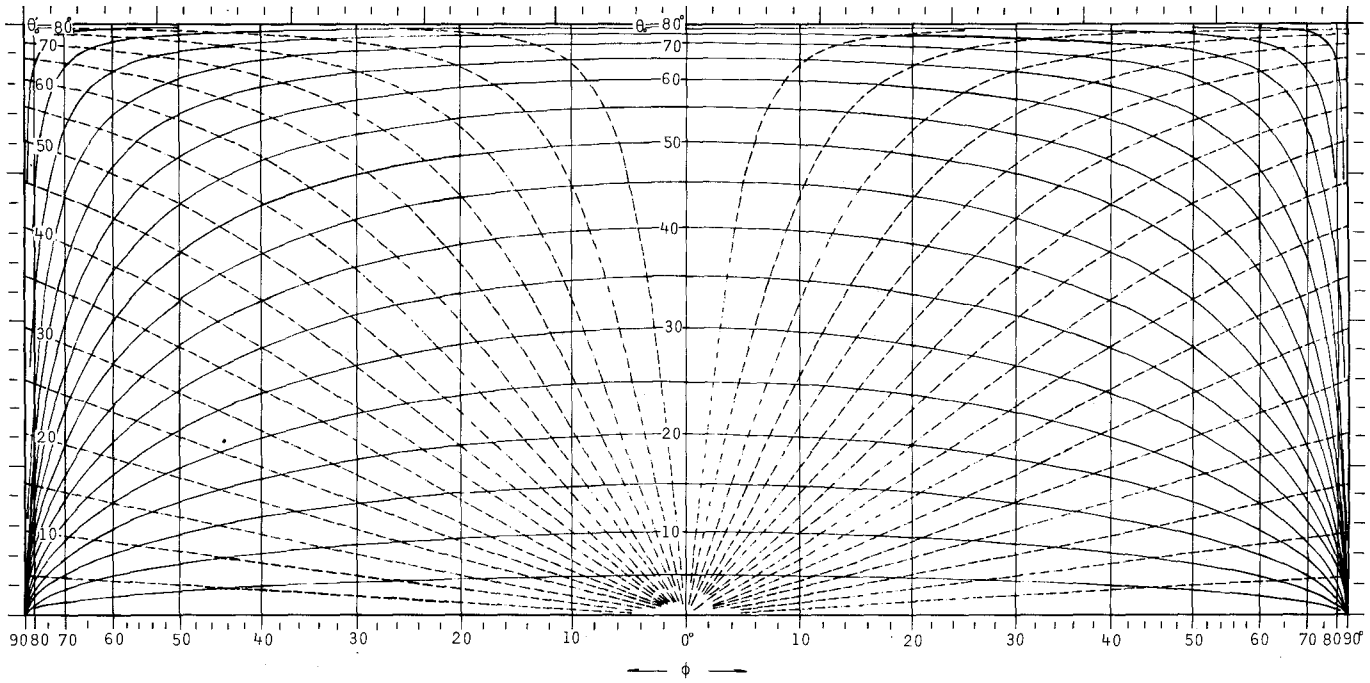
表－5.1 (a)　Y_H の値

θ° \ φ°	0	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
5	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.22	0.22	0.20	0.18	0.16	0.15	0.13	0.11	0.09	0.07	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
15	0.54	0.52	0.47	0.44	0.40	0.35	0.31	0.26	0.21	0.17	0.12	0.09	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00
20	1.02	0.99	0.90	0.83	0.76	0.68	0.59	0.50	0.41	0.32	0.24	0.17	0.11	0.06	0.03	0.01	0.00
25	1.68	1.63	1.48	1.38	1.26	1.13	0.98	0.83	0.68	0.54	0.40	0.28	0.18	0.10	0.04	0.01	0.00
30	2.50	2.43	2.23	2.09	1.92	1.72	1.51	1.29	1.06	0.84	0.63	0.44	0.28	0.16	0.07	0.02	0.00
35	3.48	3.40	3.14	2.95	2.73	2.47	2.19	1.88	1.56	1.25	0.94	0.67	0.43	0.24	0.10	0.02	0.00
40	4.60	4.50	4.20	3.97	3.70	3.38	3.02	2.63	2.21	1.78	1.36	0.97	0.62	0.35	0.15	0.04	0.00
45	5.83	5.72	5.38	5.13	4.82	4.45	4.02	3.54	3.02	2.47	1.92	1.38	0.90	0.50	0.22	0.05	0.00
50	7.12	7.00	6.66	6.39	6.06	5.65	5.18	4.63	4.02	3.35	2.65	1.94	1.29	0.73	0.31	0.07	0.00
55	8.42	8.32	7.98	7.72	7.39	6.98	6.49	5.90	5.22	4.45	3.60	2.71	1.83	1.05	0.46	0.11	0.00
60	9.70	9.60	9.30	9.07	8.76	8.38	7.90	7.32	6.61	5.78	4.82	3.74	2.62	1.55	0.69	0.16	0.00
65	10.88	10.81	10.56	10.37	10.11	9.78	9.36	8.84	8.17	7.35	6.34	5.13	3.75	2.33	1.07	0.25	0.00
70	11.94	11,88	11.70	11.56	11.37	11.12	10.79	10.37	9.81	9.09	8.15	6.93	5.38	3.57	1.75	0.43	0.00
75	12.81	12.77	12.66	12.57	12.45	12.29	12.07	11.79	11.40	10.87	10.14	9.10	7.62	5.58	3.06	0.81	0.00
80	13.46	13.44	13.39	13.35	13.29	13.21	13.10	12.96	12.76	12.47	12.05	11.40	10.36	8.61	5.72	1.87	0.00
85	13.86	13.86	13.85	13.83	13.82	13.80	13.77	13.77	13.67	13.59	13.47	13.27	12.91	12.19	10.48	5.80	0.00
90	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00

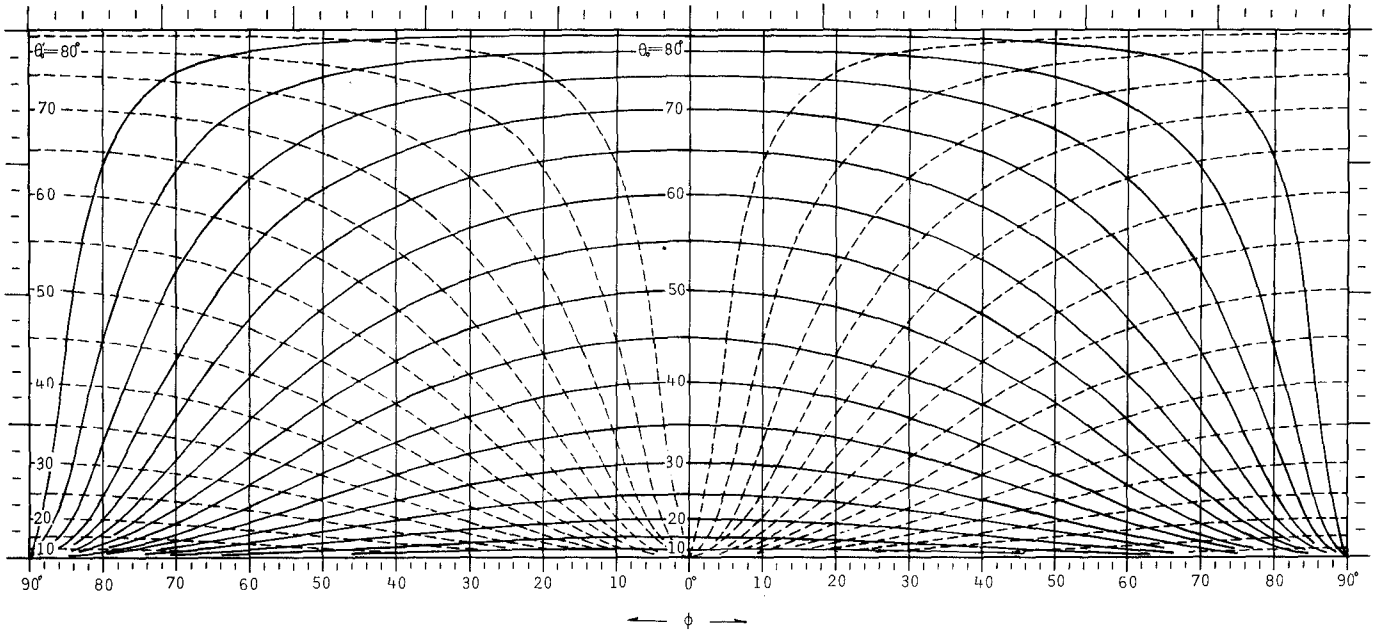
表－5.1 (b)　X_{V1}, X_{V2}, Y_V の値

$\phi°$	0	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
X_{V1}	0.000	0.174	0.342	0.423	0.500	0.574	0.643	0.707	0.766	0.819	0.866	0.906	0.940	0.966	0.985	0.996	1.000
X_{V2}	0.000	0.015	0.060	0.094	0.134	0.181	0.234	0.293	0.357	0.426	0.500	0.577	0.658	0.741	0.826	0.913	1.000

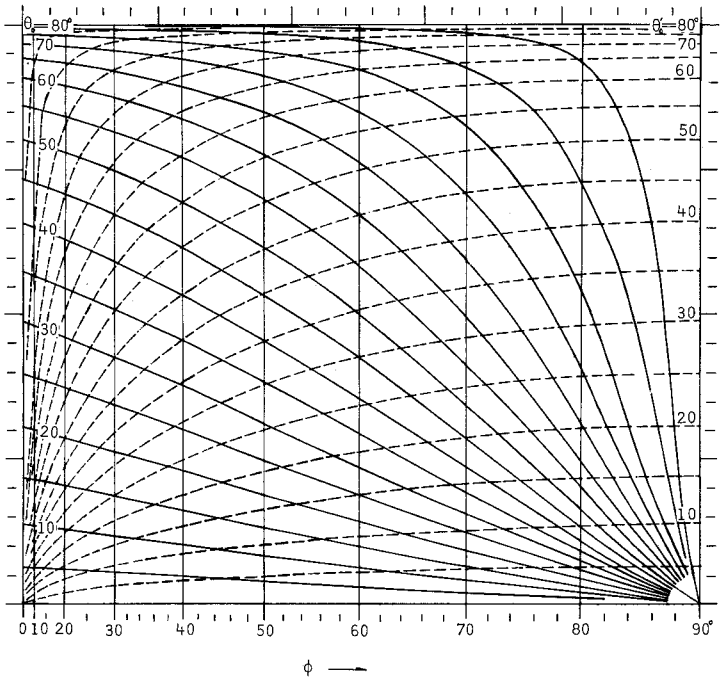
$\theta_s°$ \ $\phi°$	0	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
5	1.14	1.12	1.06	1.02	0.97	0.92	0.86	0.79	0.71	0.63	0.55	0.50	0.37	0.28	0.19	0.09	0.00
10	2.43	2.39	2.27	2.18	2.08	1.95	1.82	1.66	1.50	1.33	1.14	0.96	0.77	0.57	0.38	0.19	0.00
15	3.86	3.80	3.61	3.46	3.29	3.10	2.88	2.63	2.37	2.09	1.80	1.50	1.19	0.89	0.58	0.29	0.00
20	5.38	5.30	5.04	4.85	4.61	4.34	4.03	3.69	3.32	2.93	2.52	2.09	1.66	1.23	0.80	0.39	0.00
25	6.96	6.85	6.54	6.30	6.01	5.67	5.28	4.84	4.37	3.85	3.31	2.75	2.18	1.61	1.05	0.51	0.00
30	8.54	8.42	8.06	7.79	7.46	7.06	6.60	6.08	5.50	4.87	4.19	3.48	2.76	2.03	1.31	0.63	0.00
35	10.09	9.96	9.58	9.29	8.93	8.49	7.98	7.39	6.72	5.97	5.17	4.31	3.41	2.51	1.62	0.78	0.00
40	11.55	11.43	11.05	10.76	10.39	9.94	9.39	8.76	8.02	7.18	6.25	5.24	4.16	3.06	1.97	0.94	0.00
45	12.88	12.77	12.42	12.15	11.80	11.36	10.82	10.17	9.39	8.49	7.46	6.30	5.04	3.72	2.39	1.13	0.00
50	14.07	13.97	13.67	13.43	13.11	12.71	12.20	11.58	10.82	9.89	8.79	7.51	6.07	4.50	2.90	1.37	0.00
55	15.07	14.99	14.75	14.55	14.29	13.95	13.51	12.95	12.25	11.36	10.25	8.89	7.29	5.47	3.55	1.66	0.00
60	15.88	15.83	15.65	15.50	15.30	15.04	14.69	14.23	13.63	12.84	11.80	10.45	8.74	6.69	4.38	2.05	0.00
65	16.50	16.47	16.35	16.25	16.11	15.93	15.68	15.35	14.89	14.26	13.38	12.15	10.46	8.24	5.52	2.59	0.00
70	16.94	16.92	16.85	16.79	16.72	16.61	16.46	16.25	15.95	15.52	14.87	13.90	12.42	10.21	7.12	3.41	0.00
75	17.22	17.21	17.18	17.15	17.11	17.06	16.99	16.88	16.73	16.50	16.13	15.52	14.47	12.63	9.46	4.77	0.00
80	17.36	17.36	17.35	17.34	17.33	17.31	17.29	17.25	17.20	17.12	16.98	16.73	16.24	15.20	12.77	7.34	0.00
85	17.42	17.42	17.42	17.41	17.41	17.41	17.41	17.40	17.40	17.38	17.36	17.32	17.24	17.03	16.31	12.86	0.00
90	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42	17.42



図－5.16　水平面直接昼光率算定図（$U(\theta)_H$）



図－5.17　鉛直面直接昼光率算定図（$U(\theta)\gamma_1$）

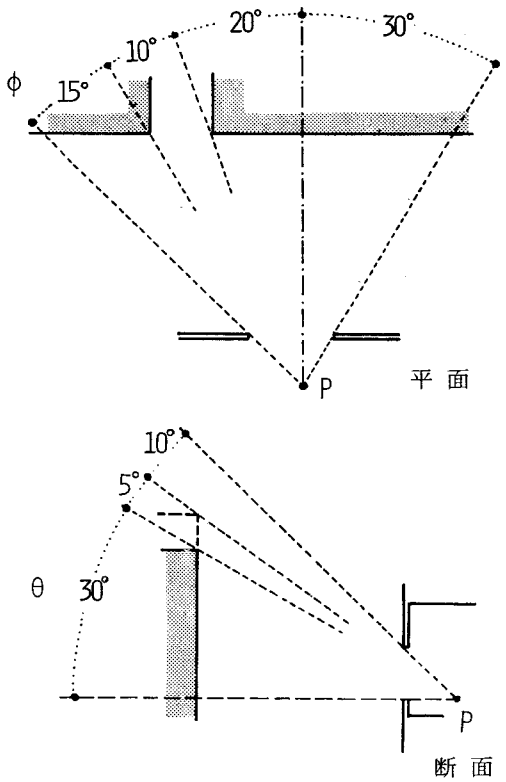


図－5.18　鉛直面直接昼光率算定図（$U(\theta)_{V2}$）

〔使 用 例〕

図－5.19 に示す P 点における直接昼光率を図－5.16 ～ 図－5.18 によって求める。

図－5.20 (a)，(b)，(c) はそれぞれ図－5.16 ～ 図－5.18 に図－5.19 の P 点における開口と障害物の図形を書き込み，直接昼光率を式 (5.19a)～(5.19c) によって求めるための枡目を書き入れたものである。いずれも太線が開口部の図形で，内部に影を施した部分は開口内に見える障害物にあたる。これから，開口部全体に対しては下記のようになる。



図－5.19

$U(\theta)_H = 4.53 + 3.20 \fallingdotseq 7.7$ %

図－5.20 (a)

$U(\theta)_{V1} = 9.82 + 7.13 \fallingdotseq 17.0$ %

図－5.20 (b)

$U(\theta)_{V2} = 3.9$ % …… 図－5.20 (c)の左図

$U(\theta)_{V2} = 1.9$ % …… 図－5.20 (c)の右図

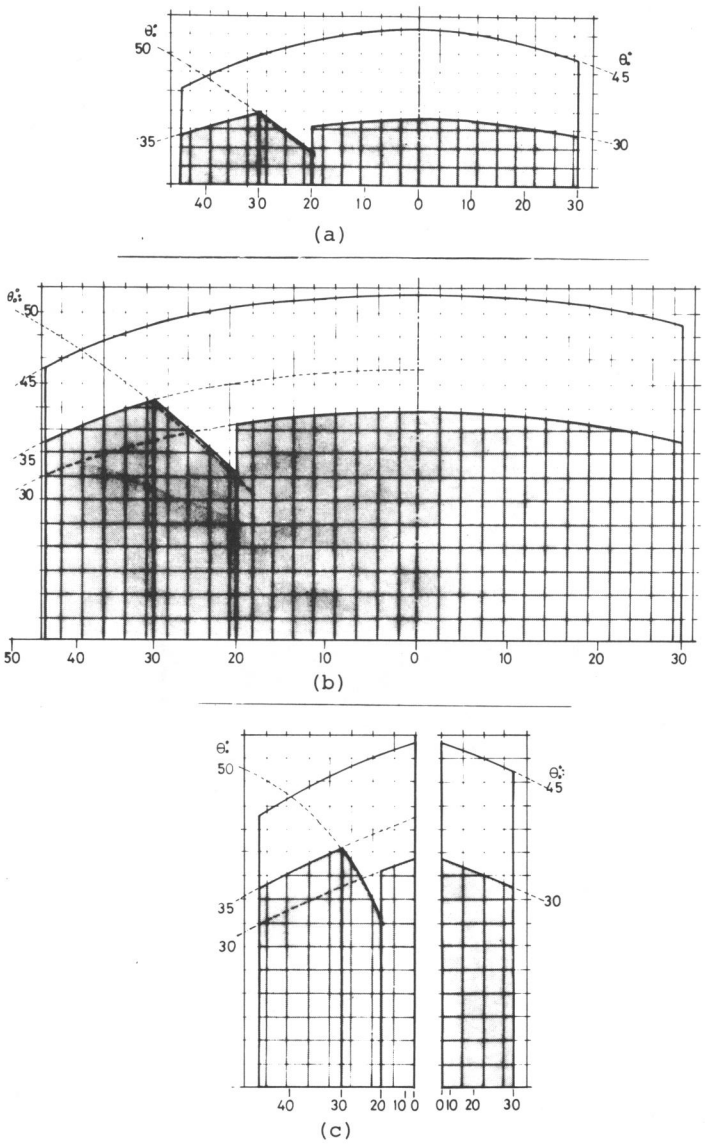
障害物部分は仮りに天空部の $1/10$ の輝度分布をもつとして計算すると，$U(\theta)_H \fallingdotseq 4.6$%，$U(\theta)_{V1} \fallingdotseq 6.8$%，$U(\theta)_{V2} \fallingdotseq 1.4$%(左)，$U(\theta)_{V2} \fallingdotseq 0.8$%(右)となる。

5.2.3 直接昼光率算定図

式(5.17a)～(5.17c)において，$Y_H \cdot X_H$，$Y_V \cdot X_{V1}$，$Y_V \cdot X_{V2}$ などが適当な数となるようにして，前節 5.1 の図－5.10 のような図を作成すれば，それと同様な取扱いによって立体角投射率（直接昼光率）$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$ を求めることができる。ここでは，Y_H，Y_V を改めて，それぞれ $f_H(\theta_n)$，$f_V(\theta_n)$ と書き表わすことにする。

$$f_H(\theta_n) = 8 \sin^3 \theta_n + 6 \sin^2 \theta_n$$

$$f_V(\theta_n) = -8 \cos^3 \theta_n + 6 \sin \theta_n \cos \theta_n + 6 \theta_n + 8$$



図－5.20

天球を分割して各区画が受照点に等照度を生ずるようにするには，¼天空を考えて，その割り方を方位ϕに関して対称に他の¼天空へ延長して描けばよい。

¼天空による直接照度は，式(5.16a)～(5.16c)において，$\theta=\pi/2$，$\phi=\pi/2$として，

$$E(\theta)_H=\frac{7\pi}{36}\cdot L_Z \qquad E(\theta)_{V1}=E(\theta)_{V2}=\frac{8+3\pi}{36}\cdot L_Z$$

であるから，$\frac{1}{4}$天空による直接昼光率$U(\theta)$はそれぞれ下記のようになる。

$$U(\theta)_H=\left(\frac{7\pi}{36}\cdot Lz\Big/\frac{28\pi}{36}\cdot Lz\right)\times 100=25\ \%$$

$$U(\theta)_{V1}=U(\theta)_{V2}=\left(\frac{8+3\pi}{36}\cdot Lz\Big/\frac{28\pi}{36}\cdot Lz\right)\times 100 \fallingdotseq 19.809\ \%$$

従って，同心円と半径とによって，前節のように，等価な $x\cdot y$ 個に分割された各区画に対応する$U(\theta)$の値は，

$U(\theta)_H$ の図に対しては $25/xy$ %，

$U(\theta)_{V1}\cdot U(\theta)_{V2}$ の図に対しては $19.809/xy$ %

である。

〔1〕 高度θに関する区画

高度θに関する区画は水平面の場合と鉛直面の場合とで異なる。それは下記の2式の相違によるものである。

$$f_H(\theta_n)=8\sin^3\theta_n+6\sin^2\theta_n,\quad f_H\left(\frac{\pi}{2}\right)=14 \quad\cdots\cdots\cdots\quad (5.20\text{a})$$

$$f_V(\theta_n)=-8\cos^3\theta_n+6\sin\theta_n\cos\theta_n+6\theta_n+8,\quad f_V\left(\frac{\pi}{2}\right)=8+3\pi \quad\cdots\cdots\quad (5.20\text{b})$$

これらは各個に求める必要があるが，計算は同じ方法で処理することができる。従って，式(5.20a)，(5.20b)を一括して$f(\theta_n)$と書くことにすれば，

$$f(\theta_1)-f(\theta_0)=f(\theta_2)-f(\theta_1)=\cdots\cdots=f(\theta_n)-f(\theta_{n-1})\quad\cdots\cdots=\frac{1}{y}\cdot f(\theta_y)$$

を満足するθ_1，θ_2，……，θ_yを求めることになる。また，$\theta_y=\pi/2$である。従って，

$$f(\theta_n)=\frac{n}{y}f(\theta_y)=\frac{n}{y}f\left(\frac{\pi}{2}\right)\quad\cdots\cdots\cdots\quad (5.21)$$

であり，これを満足するθ_nが得られれば，天空をθ_nによって地平面に平行なy個のゾーンに分割し，それに従って各区画線に対応する立体角投射図（正射影図），極射影図，その他を描くことができる。

実際に，式(5.21)からθ_nを求めることは，$f_H(\theta_n)$の場合は初等関数の範囲で処理が可能であるが，$f_V(\theta_n)$についてはそれは不可能である。

実際には，適当な第0近似値から出発して，下記のようなNewtonの逐次近似法によるのが便利である。

$$\left.\begin{aligned}\theta_{n(i)}&=\theta_{n(i-1)}+\Delta\theta_{n(i)}\\ \Delta\theta_{n(i)}&=\frac{-f(\theta_{n(i-1)})}{f'(\theta_{n(i-1)})}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(5.22)$$

実際に解くべき式の形は

$f_H(\theta_n)$に関しては　$8\sin^3\theta_n+6\sin^2\theta_n-\frac{n}{y}\cdot 14=0$ ……(5.23a)

$f_V(\theta_n)$に関しては　$-8\cos^3\theta_n+6\sin\theta_n\cos\theta_n+6\theta_n+8-\frac{n}{y}(8+3\pi)=0$ …(5.23b)

$$n=1,2,3,\cdots\cdots,y$$

である。これらに式(5.22)を適用するには，先ず第0近似値$\theta_n(0)$が必要である。この値$\theta_n(0)$は式(5.23a)，(5.23b)の右辺をそれぞれ$F(\theta_n)_H$，$F(\theta_n)_V$とおいて，θ_nに対する$F(\theta_n)$の値をプロットした曲線から推定するのがよい。この場合，$\theta_n(0)$の精度は式(5.23a)，(5.23b)が3次式で，θ_nが$0\sim\pi/2$の間にあるから，数学的には3個の解が存在し，その中の1個が求めるものであるが，計算過程で他の分枝に入るような誤差がない限りあまり問題にならない。

〔2〕 方位ϕに関する区画

方位ϕに関する区画は$U(\theta)_H$，$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$の各々の場合について相違する。

式(5.17a)～(5.17c)から，

$U(\theta)_H$に関しては　$\phi_n-\phi_{n-1}=\frac{1}{x}\cdot\frac{\pi}{2}$ ……(5.24a)

$U(\theta)_{V1}$に関しては　$\sin\phi_n-\sin\phi_{n-1}=\frac{1}{x}$ ……(5.24b)

$U(\theta)_{V2}$に関しては　$\cos\phi_{n-1}-\cos\phi_n=\frac{1}{x}$ ……(5.24c)

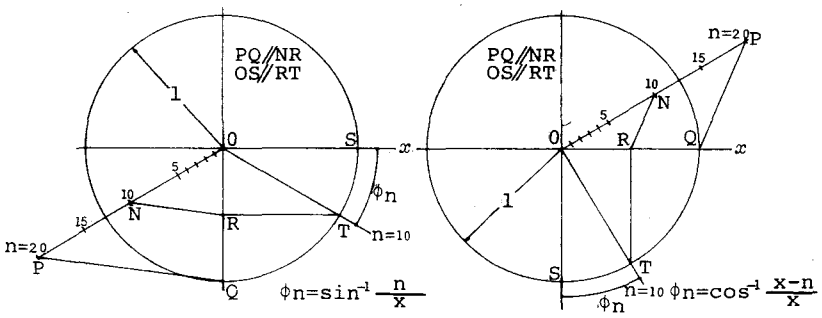
であるから，具体的には下式を計算して，それぞれの$U(\theta)$に対するϕ_nを求める。

$U(\theta)_H$ ：　$\phi_n=\frac{n}{x}\cdot\frac{\pi}{2}$ ……(5.25a)

$$U(\theta)_{V1} \quad : \quad \sin\phi_n = \frac{n}{x} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.25\mathrm{b})$$

$$U(\theta)_{V2} \quad : \quad \cos\phi_n = 1 - \frac{n}{x} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.25\mathrm{c})$$

また，図－5.21 のように，図上で求めることもできる。



図－5.21　ϕ_n の求め方

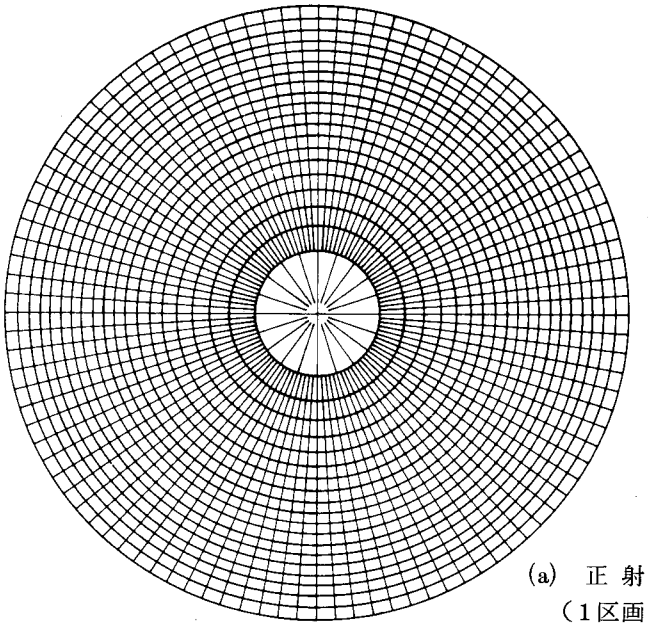
図－5.22(a)は式(5.23a)において $y=20$ とし，式(5.25a)において $x=25$ として描いた正射影図である。この場合，1区画は 25／(25×20)＝0.05％である。作図の都合上，一番内側の区画は 0.25％とした。同図(b)は天球面上の前述の区画を天球の中心を極として，天球に接する鉛直面上に射影したもので，図中に示されているスケールの1が天球の半径と等しいように作図してある。これは横軸 x，縦軸 y として

$$x = \tan\phi_j \ , \quad y = \tan\theta_i \cdot \sec\phi_j \ , \quad i, j = 1, 2, \cdots\cdots, n$$

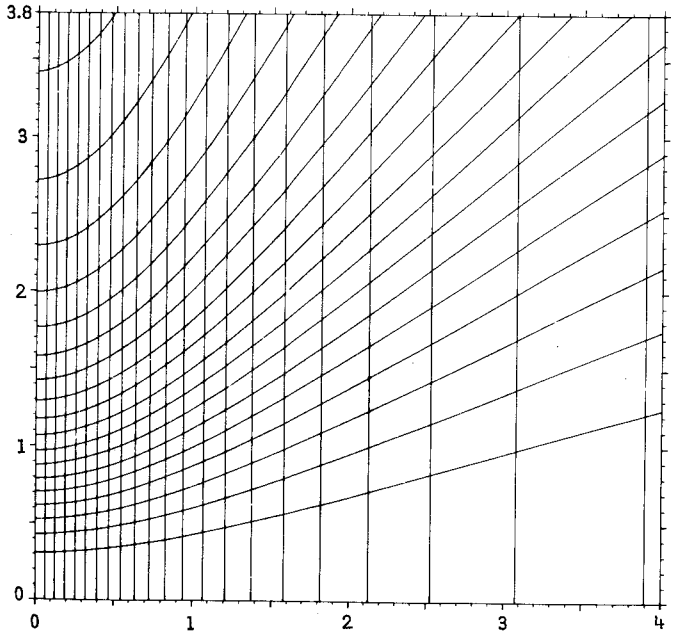
を用いて描くことができる。この図の1区画も 0.05％の直接昼光率に相当する。

図－5.23(a)は式(5.23b)において $y=20$，式(5.25b)において $x=20$ として描いた図あり，また，図－5.24(a)は式(5.23b)において $y=20$，式(5.25c)において $x=20$ として描いた正射影図である。これらの図の場合の1区画は 19.809／(20×20)＝0.0495 ≒ 0.05％である。両図とも作図の都合で，1区画は外側は 0.1％，内側は 0.25％，中間の区画は 0.05％の直接昼光率を与える。

図－5.23(b)および図－5.24(b)は，図－5.22(b)と同様の図であり，図中のスケールの1が天球の半径になるように描いてある。これらの図の1区画は0.05％の直接昼光率に相当する。

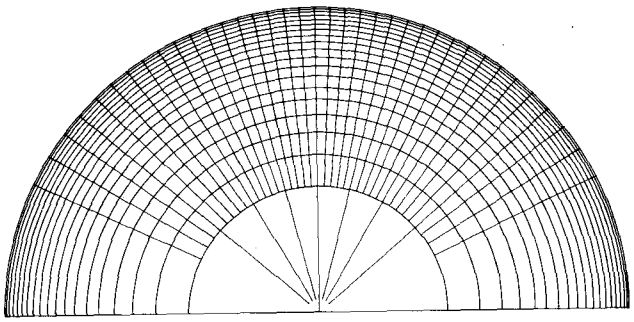


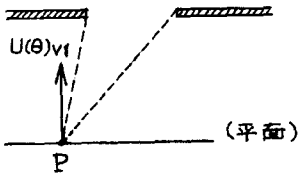
(a) 正 射 影 図
（1区画0.05％，内側0.25％）



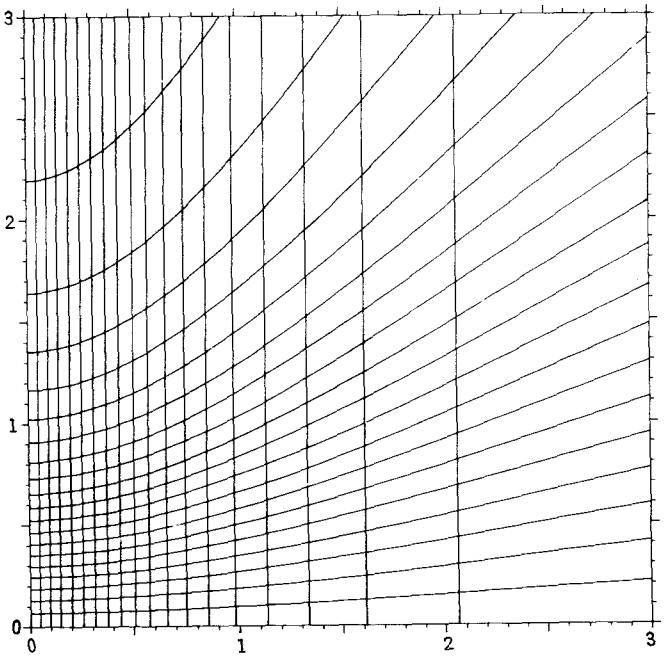
(b) 鉛 直 面 図
（1区画0.05％）

図－5.22　水平面に対する直接昼光率
$U(\theta)_H$ 算定図表



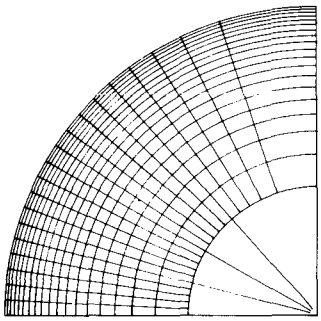


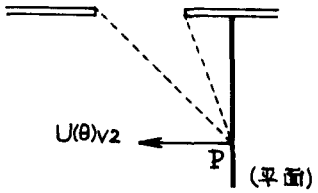
(a) 正射影図
（1区画0.05%，外側0.1%，
内側0.25%）



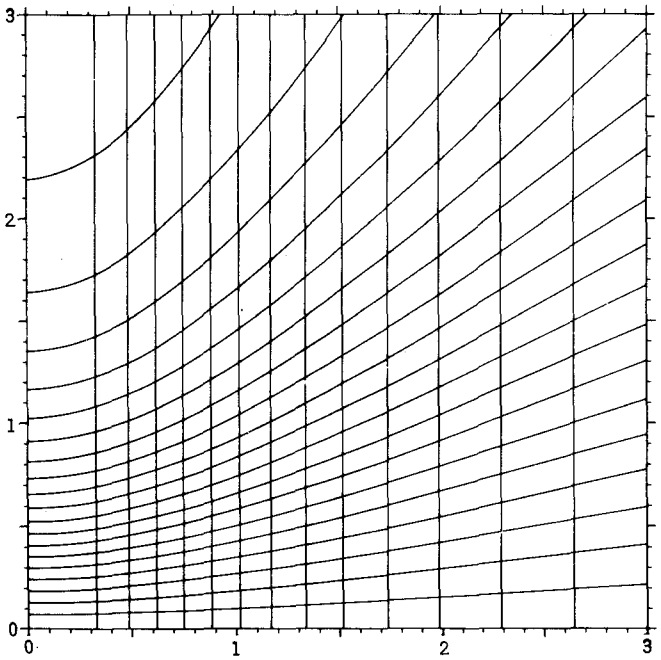
(b) 鉛直面図
（1区画0.05%）

図－5.23 鉛直面に対する直接昼光率
$U(\theta)v_1$ 算定図表



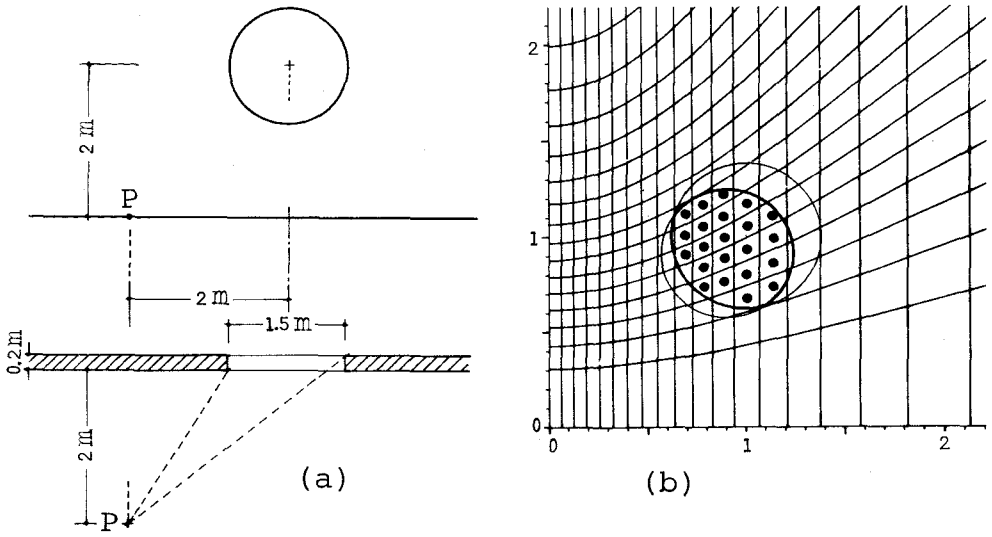


(a) 正射影図
（1区画0.05%，外側0.1%，
内側0.25%）



(b) 鉛直面図
（1区画0.05%）

図－5.24 鉛直面に対する直接昼光率
$U(\theta)_{V2}$ 算定図表



図－5.25　$U(\theta)_H$ の計算例

図－5.25 は(a)図のような厚さ 20 *cm* の壁にある円形窓による P 点の直接昼光率を求めるもので，(b)図は $U(\theta)_H$ 算定図を示す。この場合，$U(\theta)_H \fallingdotseq 22$ ケ $\times 0.05 = 1.1$ % となる。

$U(\theta)_{V1}$，$U(\theta)_{V2}$ の場合も全く同様に求めることができる。(a)図のような円形窓に対しては，$U(\theta)_{V1} \fallingdotseq 1.0$ %，$U(\theta)_{V2} \fallingdotseq 0.95$ % となる。

5.3　第5章のまとめ

任意の形態を有する光源による直接昼光率の算定は図式解法による方が簡便である。この章では，先ず，均一輝度天空の場合におけるワルドラム図，立体角投射図を作成して，その使用例について述べた。次に，ＣＩＥ標準曇天空の場合には，受照面の位置によって別々の図表を作成しなければならないから，各々の受照面の位置に従って，ワルドラム図と立体角投射図に相当する計算図表の作成方法とその利用例について述べた。

参考文献

1) 渡辺　要：建築計画原論Ⅰ，丸善，昭和37年3月

2) 伊藤克三・手塚二郎・森肅：天空輝度分布を考慮した直接昼光率計算法，日本建築学会論文報告集，第103号，昭和39年10月

3) 小島武男：水平面に対する立体角投射率の1計算図，日本建築学会論文報告集，第103号，昭和39年10月

4) 小島武男：鉛直面に対する立体角投射率の1計算図，日本建築学会論文報告集，号外，昭和40年9月

5) 小島武男：鉛直面に対する立体角投射率の1計算図(2)，日本建築学会東海支部研究報告集，第4号，昭和40年12月

6) 小島武男・比嘉俊太郎・岡本俊二・田村栄一：非一様輝度光源面による直接昼光率の1計算図(ＣＩＥ曇天空に対するワルドラム図)，日本建築学会東海支部研究報告集，第8号，昭和45年11月

6. 曇天空の天頂輝度

6.1 測定の目的

省エネルギーの観点から，室内照明における昼光の有効利用に関する問題が追求されつつあり，その解決が必須となっている。また，視環境に関する面からも昼光人工併用照明の問題が考究されるようになってきた。昼光人工併用照明による照度や輝度，あるいは窓面によるグレアに関する問題を解決するには，天空輝度の値を知らなければならない。曇天空の場合の輝度分布の式[1)]は天空要素の輝度を天頂輝度に対する比として表わされているので，曇天時の天空輝度を求めるには天頂輝度がわかればよい。

以上のことから，曇天空における天頂輝度を表わす標準式を確立し，この式に基づいて，測光量として把握できる資料を得ることが測定の目的である。

6.2 測定資料とその検討

天頂輝度の測定[2),3)]は1969年10月13日から1978年11月8日までの期間に，名古屋工業大学土木建築棟屋上，名城大学理工学部2号館屋上及び愛知工業大学2号館屋上で行った。

測定資料は輝度計（ミノルタオートスポットメーター1°）を使用して得たものと，写真測光法により測定して得たものである。

測定時における天空状態は観察によって，「澄晴れ」，「靄晴れ」，「雲晴れ」，「薄曇り」，「雨曇り」などと分類し，合わせて日射の有無，雲の状態なども記録した。測定して測られた資料のうち，記録に疑問のあるものと，結果から判断して測定上の過失と考えられるものは除外した。表-6.1に測定年月及び場所を示す。また，測定資料を太陽高度別に分類したものを表-6.2に，天頂輝度の測定資料を表-6.3に示す。

表－6.1　測定年月及び場所

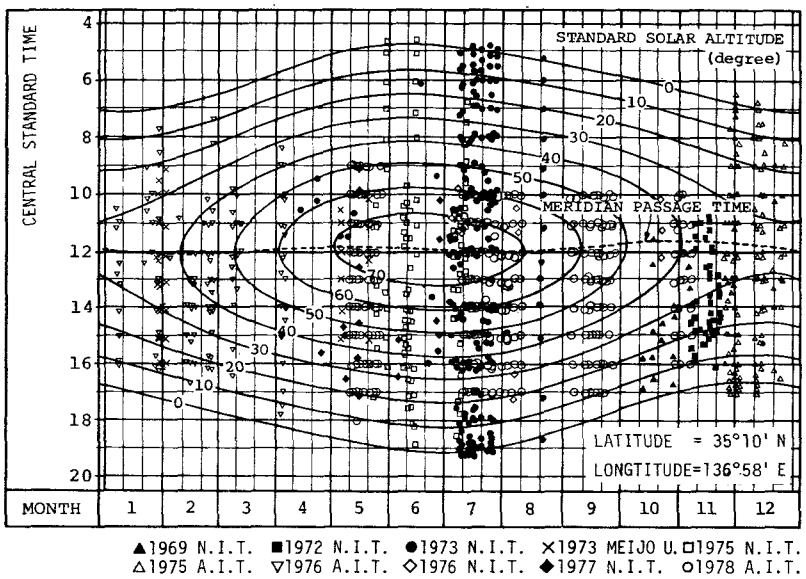
NO. OF PERIOD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
DATE	1969 10.13 ~ 11.06	1972 11.07 ~ 11.17	1973 06.22 ~ 08.21	1973 01.29 ~ 05.21	1975 05.23 ~ 07.12	1975 11.25 ~ 12.24	1976 01.08 ~ 04.05	1976 07.06 ~ 10.22	1977 04.26 ~ 06.29	1978 05.11 ~ 11.08	1969 10.13 ~ 1978 11.08
PLACE	N.I.T.	N.I.T.	N.I.T.	MEIJO U.	N.I.T.	A.I.T.	A.I.T.	N.I.T.	N.I.T.	A.I.T.	
A	15	18	113	22	24	108	60	8	9	161	538
B	0	26	41	3	33	13	4	2	0	94	216
C	0	0	31	2	39	6	41	3	7	99	228
TOTAL	15	44	185	27	96	127	105	13	16	354	982

表－6.2　太陽高度別資料数

SOLAR ALTITUDE (degree)	NO. OF PERIOD 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
- 0	0	0	13	0	2	15	0	0	0	0	30
0 - 5	1	0	20	0	3	15	0	0	0	0	39
5 - 10	2	1	11	0	4	10	6	0	0	5	39
10 - 15	1	3	15	1	1	11	4	0	0	6	42
15 - 20	2	6	8	0	7	10	8	1	1	3	46
20 - 25	2	9	9	3	4	14	8	0	0	36	85
25 - 30	1	8	2	3	4	25	8	1	2	4	58
30 - 35	1	6	5	5	7	27	13	0	1	28	93
35 - 40	2	11	20	4	5	0	15	1	1	23	82
40 - 45	2	0	6	2	3	0	16	2	2	20	53
45 - 50	1	0	9	0	6	0	14	0	3	36	69
50 - 55	0	0	7	1	5	0	6	0	2	22	43
55 - 60	0	0	14	1	7	0	4	2	0	50	78
60 - 65	0	0	19	1	5	0	3	1	1	30	60
65 - 70	0	0	7	3	11	0	0	2	1	32	56
70 - 75	0	0	8	3	13	0	0	2	1	48	75
75 -	0	0	12	0	9	0	0	1	1	11	34
TOTAL	15	44	185	27	96	127	105	13	16	354	982

表－6.3　天頂輝度別資料数

ZENITH LUMINANCE (K.cd/m)	NO. OF PERIOD 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
- 0.5	1		27		4	32	1				65
0.5 - 1	3	1	12		2	19	10			4	51
1 - 5	11	26	33	11	16	64	55	2	1	97	316
5 - 10		12	40	8	22	11	29	6	6	81	215
10 - 15		5	18	2	20	1	3	2	5	64	120
15 - 20			24	5	19		6	3	3	42	102
20 - 25			8		5		1		1	31	46
25 - 30			9	1	4					17	31
30 - 35			3		4					9	16
35 -			11							9	20
TOTAL	15	44	185	27	96	127	105	13	16	354	982



図－6.1　全資料の分布

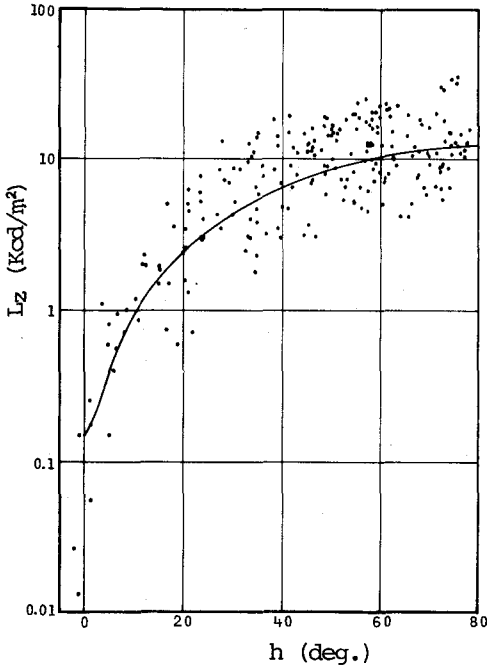
図－6.1は季日，時刻及び測定場所に関して，資料の分布の状態を検討するために，測定資料を太陽高度図[4]の中にプロットしたものである。測定資料は夏季のものが最も多いが，秋季及び冬季のものも相当数あり，ほぼ年間にわたる資料を含んでいるとみなすことができる。

天空状態は「澄晴れ」，「霧晴れ」をA，「雲晴れ」をB，「薄曇り」，「雨曇り」をCとし，さらに，「やや明るい曇り」をC'として分類し，測定資料の検討を行った。Aは日射がある状態，Bは太陽が雲の中に出入りするような不安定な天空状態，C，C'は日射がない天空状態を表わしている。

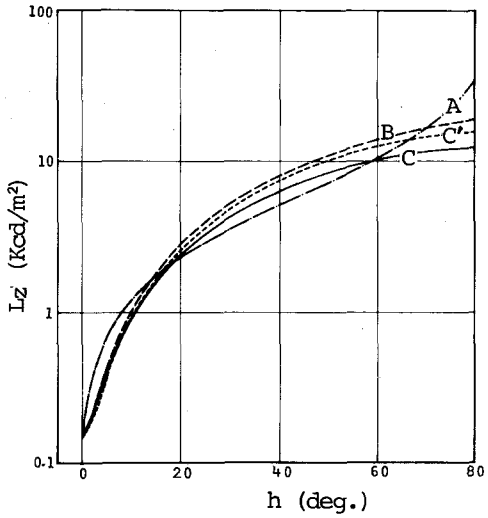
本論文で取扱うのは曇天空における資料Cに関するものである。図－6.2は曇天空における天頂輝度の測定資料の分布を示す。縦軸は天頂輝度(L_Z)，横軸は太陽高度(h)を表わす。この図の中の曲線は測定資料を太陽高度5°ごとの階級に分けて，その相乗平均を求めて，これを回帰したもので，曇天空における天頂輝度の標準式(6.1)を与えるものである。

$$L_Z = 12500 \sin^{1.6} h + 150 \quad [cd/m^2] \quad \cdots\cdots (6.1)$$

参考のために，曇天空の場合と同様な手法によって，各種の天空状態における天頂輝



図－6.2　曇天空の測定資料と天頂輝度



図－6.3　各種の天空状態における天頂輝度

度を示したのが図－6.3である。この図から，太陽高度がおよそ 20°～60° の間では，曇天空の天頂輝度は晴天空のそれよりも大きいことが認められる。この範囲では晴天空の天頂輝度は最小の値を示している。

図－6.4は曇天空の天頂輝度について，これまでに各国で提案されているもので，[5),6)] 下記の諸式を縦軸に天頂輝度(L_Z)をとり，横軸に太陽高度(h)をとってプロットしたものである。これらは，いずれも代表値を表わすものである。

(a)　Krochmann　:　$L_Z = 8600 \sin h + 123$　$[cd/m^2]$

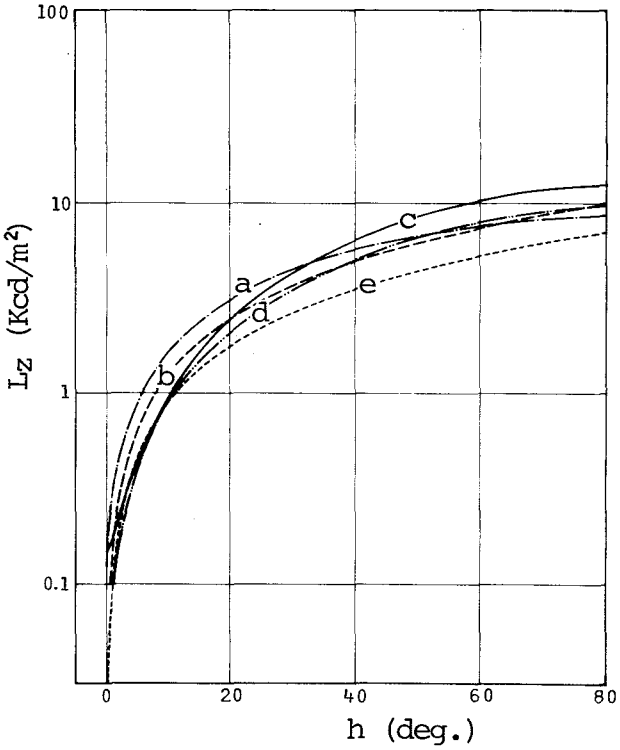
(b)　Nagata　:　$L_Z = (9/7\pi)\ 300\ h$　$[cd/m^2]$

(c)　Higa　:　$L_Z = 12500 \sin^{1.6} h + 150$　$[cd/m^2]$

(d)　Kittler　:　$L_Z = 3990\ (1 + \frac{3}{2} \sin h)\ \sin h$　$[cd/m^2]$

(e)　Hopkinson　:　$L_Z = (9/7\pi)\ 215\ h$　$[cd/m^2]$

同図の実線(c)は式(6.1)を示したもので，太陽高度が35°以上では最も大きい値を示している。逆に35°以下では曲線(a)が最大の値を示している。太陽高度10°以上では，曲線(e)が最小の値を与えていることがうかがわれる。全般的な傾向から，曇天空における天頂輝度を表わす式(6.1)は妥当なものと考えられる。



図－6.4　曇天空による天頂輝度の提案値

従って，曇天空による全天空照度は式(6.1)を第2章の式(2.3)に代入して，次のように表わすことができる。

$$E_S=\frac{7}{9}\cdot\pi\cdot L_Z$$

$$=\frac{7}{9}\cdot\pi\cdot(12500\ \sin^{1.6}h+150)\qquad [lx]\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (6.2)$$

曇天空による全天空照度に関しても，各国で提案された下記の諸式がある。[5),6)] これらをプロットしたのが図－6.5である。

(a) Feitsma : $E_S=467\,h$ [lx]

(b) Higa : $E_S=\frac{7}{9}\ \pi\ (12500\ \sin^{1.6}h+150)$ [lx]

(c) Krochmann : $E_S=21000\ \sin h+300$ [lx]

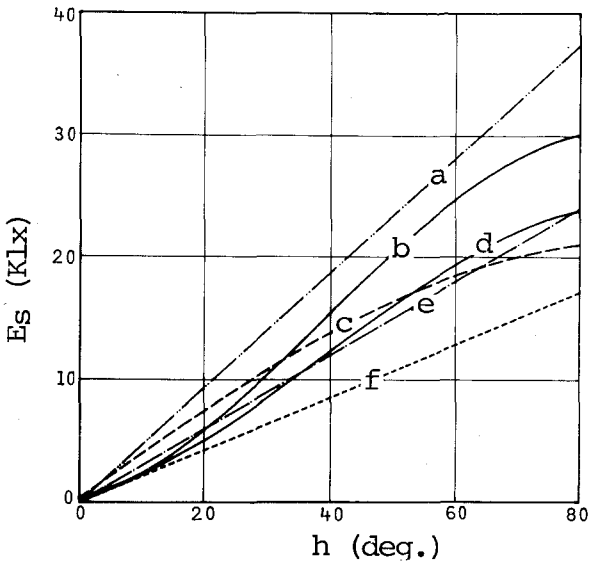
(d) Kittler : $E_S=9750\ (1+\frac{3}{2}\ \sin h)\ \sin h$ [lx]

(e) Nagata : $E_S=300\,h$ [lx]

(f) Hopkinson : $E_S=215\,h$ [lx]

図－6.5 で実線(b)は式(6.2)をプロットしたものである。縦軸は全天空照度(E_S)，横軸は太陽高度(h)を示す。式(6.2)のように，全天空照度 E_S を太陽高度の関数として表わすことによって，任意時刻における E_S を容易に求めることもできる。

これらはいずれも代表値を表わすものである。



図－6.5　曇天空による全天空照度

6.3　年間の累積頻度分布曲線[7),8)]

前節までに曇天空の天頂輝度について述べたが，太陽高度あるいは天空状態に対応して，採光計算を行うことは煩雑でもあり，無意味である。従って，実際の採光設計を目的とした天空輝度あるいは天空照度を求める場合には，種々の天空状態を包含した年間の全昼間の時間帯に対するそれらの出現頻度を考え，これに基づいて設計を行うことが合理的であろう。この場合，昼間の時間帯を就業時間帯を対象とする考え方と，太陽高度 10° 以上の時間帯，いわゆる照明学的昼間を対象とする考え方とがある。この章では，現在，最も一般的な就業時間帯である午前 9 時から午後 5 時までを対象として，曇天空による天頂輝度の年間の累積出現頻度分布について考える。

先ず，年間を通じて，太陽高度の出現頻度を求め，それに対する天頂輝度の相対出現頻度を求める。

次に，下記の式(2)に示される天頂輝度は，上限式(1)と下限式(3)とで表わされる範囲内に分布する天頂輝度の値の代表値と考える。

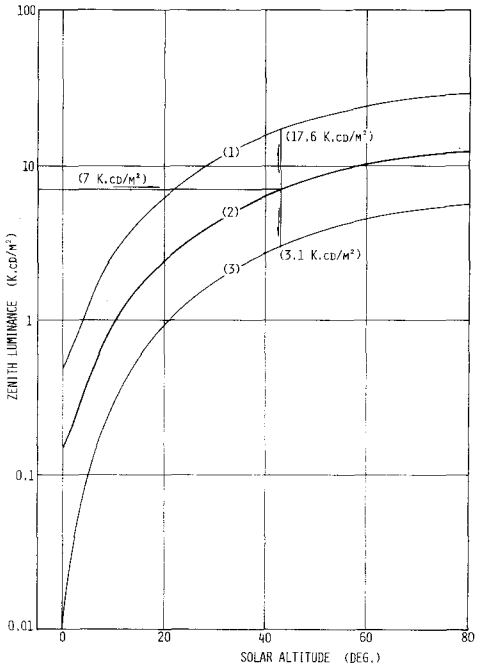
$$L_{zu} = 30000 \sin^{1.5} h + 500 \quad [lx] \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$L_z = 12500 \sin^{1.6} h + 150 \quad [lx] \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$L_{zl} = 6000 \sin^{1.75} h + 10 \quad [lx] \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

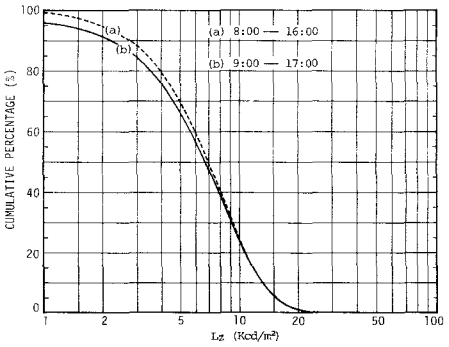
ある太陽高度に対する天頂輝度の値は，式(2)の値を中心として，その上下にそれぞれ

正規分布するものと仮定する。この場合，この値の上下それぞれに含まれる資料は3σ（σは標準偏差）の範囲内に分布するものとする。このことを図－6.6に例示すると，天頂輝度の値が7 Kcd/m^2のときの相対出現頻度は8.19％と計算され，そのときの輝度幅は，上下それぞれ（17.6－7）Kcd/m^2，(7－3.1) Kcd/m^2となり，それぞれの輝度幅に相対出現頻度の½を正規分布に従って配布する。このようにして，1 Kcd/m^2ごとの天頂輝度の相対出現頻度が求められ，それに基づいて，年間の累積頻度分布曲線を描くことができる。



図－6.6

図－6.7は前述のようにして描いた曇天空における累積頻度分布曲線を示す。同図の(a)は就業時間帯を午前8時から午後4時までとしたもので，(b)は午前9時から午後5時までとして描いた。この図から，曇天時には，就業時間帯は午前8時から午後4時までとする方がよいと思われる。



図－6.7　累積頻度分布曲線

6.4　累積頻度分布曲線の応用例

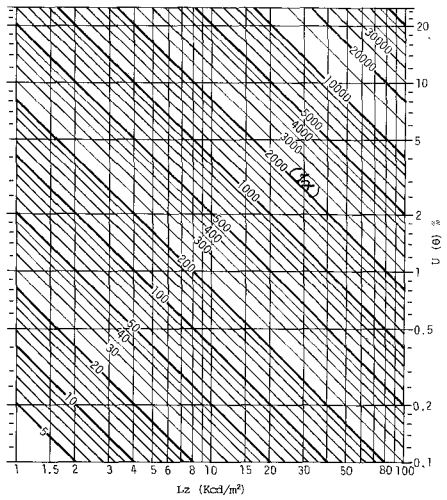
採光設計に際して，天頂輝度の累積頻度分布曲線を利用する場合，天頂輝度の出現頻度を何％に設定するかということは議論の余地があろうが，天頂輝度の出現頻度がわかれば，そのときの天頂輝度が求められる。従って，測光量としての照度値も安全率を見込んで決定されることになる。

図－6.8は曇天時における直接照度，直接昼光率及び天頂輝度の関係を示す図表である。この図は下記の関係を利用して描いたものである。

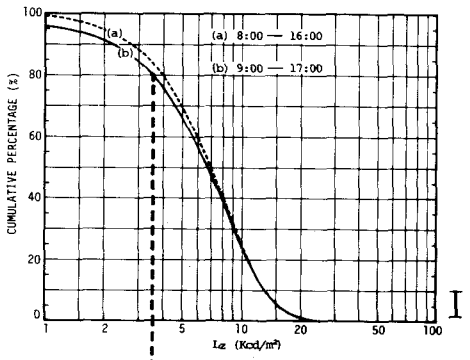
$$\left.\begin{aligned} U(\theta)&=\frac{E}{E_S}\times 100 \quad [\%] \\ E_S&=\frac{7}{9}\cdot\pi\cdot L_Z \quad [lx] \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots (6.3)$$

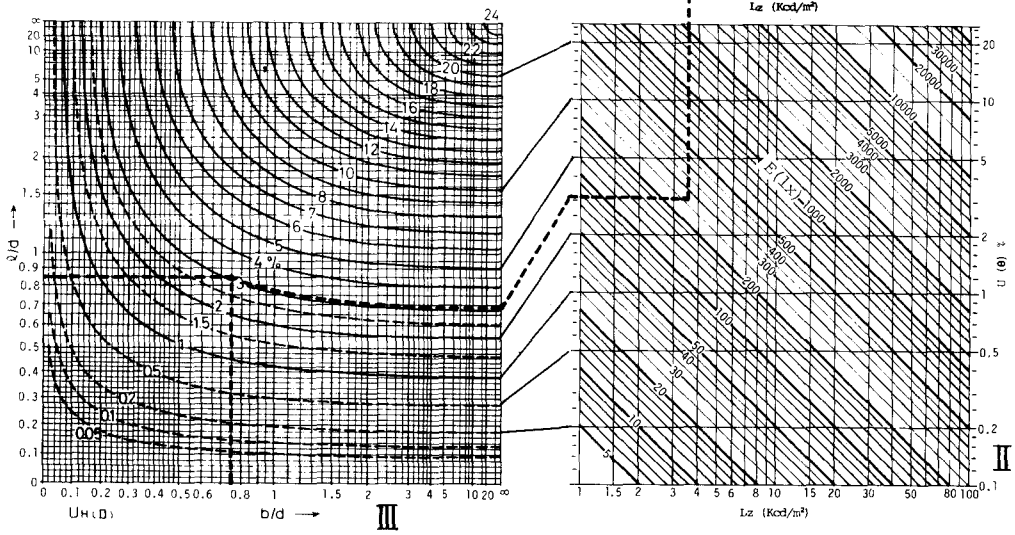
ここで，$U(\theta)$は直接昼光率(%)，E_Sは全天空照度(lx)，Eは受照点の直接照度(lx)，L_Zは天頂輝度(cd/m^2)である。

図－6.9は(I)の部分に図－6.7の累積頻度分布曲線を，(II)に図－6.8の直接照度に関する図表を配列し，さらに(III)に第3章の図－3.10の直接昼光率計算図表を組み合わせたものである。



図－6.8　直接照度に関する図表





図－6.9

このように組み合わせることによって，任意の二者から他の一つが求められる。

例えば，図－6.9に示す点線は開口部の高さ1.7 m，幅1.5 mで，開口部から室奥部2 mの受照点で，天頂輝度の出現頻度が80％のとき，直接照度は260 lxであることを示している。

また，図－6.9の(III)の直接昼光率計算図表を，第3章に記述した他の光源形態による計算図表と取り換えて取み合わせることにより，種々の形態の光源に適用することができる。

このような図表を利用すれば，測光量としての照度値，あるいは天空輝度の値が得られる。従って，昼光人工併用による照明設計が可能となる。

6.5 第6章のまとめ

この章では，名古屋（北緯35°10′）において，過去10年間に断続的に測定された天頂輝度の資料を統計的に処理して，曇天空の天頂輝度を太陽高度の関数として表わした。この計算式で与えられる値を代表値として，ある太陽高度に対応する天頂輝度の値は，この代表値を中心として，その上下にそれぞれ正規分布するものと仮定し，年間の天頂輝度の累積頻度分布曲線を求めた。この累積頻度分布曲線と直接昼光率計算図表，及び直接照度に関する図表を組み合わせて，任意の二者から他方が求められる図表を作成した。このような図表を利用すれば，曇天空の場合の測光量としての照度値，あるいは天空輝度の値が得ることができ，従って，この図表は昼光人工併用による照明設計に使用できることを述べた。

参考文献

1) Proceeding 13th Session CIE, Vol. 2, 1955

2) 中村洋・沖允人・比嘉俊太郎：中間天空状態における天空輝度分布に関する研究(II)——天頂輝度について——，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和49年10月

3) 小島武男・中村洋・永田忠彦・比嘉俊太郎・沖允人：天頂輝度に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和51年10月

4) 中村洋・沖允人：採光設計のための基礎的資料に関する研究

(1)—— 太陽高度と標準全天空照度（その1）

同(2) ── 太陽高度と標準全天空照度(その2)

同(3) ── 太陽の標準赤緯と標準均時差 ──

同(4) ── 標準太陽高度と標準全天空照度 ──, 日本建築学会東海支部研究報告集第17号, 昭和54年2月

5) J. Krochmann, M. Seidl : Quantitative Data on Daylight for Illuminating Engineering, Lighting Research & Technology, Vol. 6, No.3, 1974

6) 永田忠彦：晴天空並びに曇天空の輝度分布, 学位論文(東京大学), 昭和46年8月

7) 伊藤克三・大野治代：天空輝度の設計用標準値に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第215号, 昭和49年1月

8) 小島武男・中村洋・比嘉俊太郎・沖允人：天頂輝度に関する統計的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第18号, 昭和55年2月

7. 総　括

はじめに研究の背景と目的について述べ，既往の研究と本研究の関連性について記した。以下，これまでに得られた結果をまとめる。

(1) 曇天空の輝度分布を測定して，一様に濃い曇天空の場合のＣＩＥ標準輝度分布の式は，わが国においても実状とかなりよく一致することを確かめた。従って，曇天空の場合の採光計算は実態に基づいて行う方が正確である。このことから，曇天空による直接照度の基本式を求め，この基本式を鉛直な台形光源に適用して直接昼光率の計算式を誘導した。

(2) 台形光源による直接昼光率の計算式を若干操作して，鉛直な長方形光源及び直角三角形光源による直接昼光率の計算式を導いた。

また，水平な直角三角形光源による計算式より，水平な長方形光源による直接昼光率の計算式を求めた。さらに，これらの利用の簡便化のため，以上に求めた諸式を図表化あるいは数表化し，最も一般的な形態である鉛直な長方形光源に関して，その計算例を示し，均一輝度天空の場合と比較検討した。

(3) 鉛直及び水平な円形光源による直接昼光率の計算式を求め，その計算図表を作成した。この種の光源は矩形光源ほど一般的ではなく，鉛直な円形光源の計算式は近似的な値しか与え得ない。しかし，円形中庭に面する外壁面上の点，中庭内部の点などに対しては，水平な円形光源による直接昼光率は正確に適用することができる。

(4) 任意の形態の開口部（光源）による直接昼光率の図式解法について述べた。複雑な形態を有する開口部による直接昼光率の計算は図式解法による方が簡便である。先ず，均一輝度天空の場合の計算図表を作成し，曇天空の場合との相違点について考察した。曇天空の場合の図式解法に関しては，受照面の位置によって別々の計算図表を作成しなければならないから，各々の受照面に対するワルドラム図と立体角投射図に相当する図を作成し，その使用例を示した。

以上のことから，曇天空の場合の直接昼光率の算定は，矩形及び直角三角形光源に関しては第２章，第３章により，円形光源に関しては第４章を参照して行うことが可能である。また，複雑な形態の光源に関しては第５章の方法を適用すれば，すべて求めるこ

とができる。

(5) 上述の(4)までの直接昼光率は，天空光による明るさの程度，あるいはその分布を知るには有用な指標と考えられる。しかし，現在のように昼光人工併用照明を行う場合には，昼光率を測光量に換算して視覚に結びつける必要がある。このようなことから，曇天空における天空輝度あるいは照度を求めることを試みた。

曇天空の天頂輝度を実測して得た資料を統計的に処理して，天頂輝度を求める式を太陽高度の関数として表わした。従って，曇天空の場合の天空要素の輝度及び照度も太陽高度に関して求められるようにした。また，天頂輝度の計算式に基づいて，年間の累積頻度分布を求め，天頂輝度の出現頻度がわかれば，天空輝度，照度などが求められることを示した。さらに，この天頂輝度の累積頻度分布曲線を直接照度に関する図表及び直接昼光率計算図表と組み合わせて任意の二者から他方が求められる図表を作成した。

曇天空の場合，このような図表を利用すれば，光源の形態によって，直接昼光率を測光量としての照度値，あるいは輝度値に換算され，昼光人工併用による照明設計が可能となることを記述した。

本論文は曇天空の場合の直接照度に関して詳細に検討を行ったものであるが，引き続き，あらゆる天空状態を包含するよう考慮して，より有効な昼光の利用方法を確立するために研究を進めていく所存である。そのため，直射日光照度に関して，太陽追跡装置による長期測定を行い，同時に天空光照度なども記録して，これらの相互の関連性を検討するように準備中である。これにより直射日光や天空光の変動の実態をより的確に把握し，全昼光による照度の予測ができれば，より合理的な昼光照度設計法の確立が可能となる。

採光・照明設計の終局の目標は快適な視環境を構成することである。すなわち，視対象をはっきり見ることができ，目的とする視作業に適った照明を行うことであり，不快グレアがなく，かつ疲労感が極力少ない快適な照明を行うことである。さらに，室の使用目的に応じた人間本位の照明を行うことである。従って，今後，照明の量のみならず質的にも高い照明方法についても探究していく考えである。

謝　　辞

筆者が本研究に取り組む端緒を与えていただき，また，研究を進めるに当り，終始懇切なる御指導，御鞭撻を賜った名古屋大学名誉教授小島武男博士（現 名城大学教授）に対し，衷心より謝意を表します。

また，採光・照明設計に対する研究の進め方，そのあり方，考え方等に関して有益な御助言，御指摘を賜り，かつ本論文の作成に当り，懇篤なる御指導と御教示を賜った大阪大学教授伊藤克三博士に対し，謹んで感謝の意を表します。

さらに，長年にわたり貴重な御助言，御援助をいただき，激励して下さった名古屋工業大学助教授中村洋博士，名城大学助教授沖允人氏に対し，深く謝意を表します。

また，筆者が名古屋大学在職当時，種々御協力賜り，激励して下さった愛知県公害調査センター騒音振動科科長鵜飼正保氏，富山職業訓練短期大学校指導員岡本俊二氏に対し，深謝致します。

尚，名城大学における「ＳＤゼミ」の諸先生からも有用な御助言と暖かい励ましを受けました。ここに記して謝意を表します。