

開閉式ドームにおける 照明計算法の研究と光環境の解析

松 浦 邦 男 *1
上 谷 芳 昭 *2
岩 田 朋 子 *2
堀 大 成 *3
斎 藤 清 *4

梗 概

開閉式ドームにおける光環境を正確に予測するため、主として昼光照明の計算法について研究し、この成果を利用したドーム内における野球のボールの見え方等の解析例を示す。これによって、ボールの見え方を良くできる建築、及び、設備面からの対応策の検討が可能となる。

1. はじめに

スポーツ競技を主対象とした膜構造ドームにおいては、事前にその光環境（特に輝度分布）を正確に予測し、プレイヤー、観客などに不適切な視環境条件を、建築、及び、設備の両面からの対応によって改善する必要がある。特に野球を主体とした膜構造ドームにおいては、ボールと背景の膜との輝度対比が非常に小さくなり易いため、プレイヤーがボールを見失う機会が多く、現状においても何らかの対策が望まれている。

また最近では、膜構造ドームも閉鎖式から開閉式に技術的重点が移る傾向にあり、これによって光環境条件が益々複雑化するの避けられない状況になりつつある。

このような状況の推移を考慮し、今回筆者らは開閉式膜構造ドームにおける照明計算法、及び、これに基づいたコンピュータプログラムを開発し、これを使って野球のボールの見え方等について解析したので報告する。

2. 照明計算の流れ

ドームにおける照明計算の大まかな流れを図1に示す。このうち今回新規に研究・開発の対象となったのは昼光照明計算の部分で、人工照明の計算は従来使われていた方法を踏襲している。

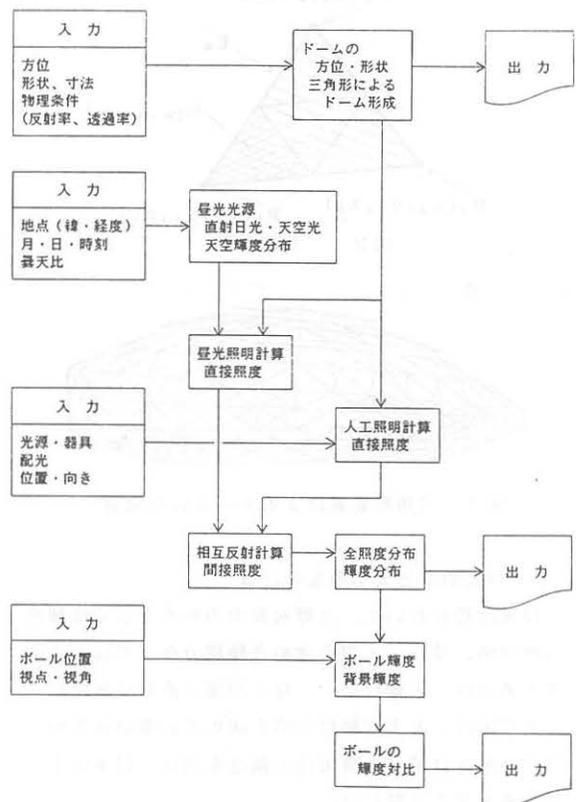


図1 ドームにおける照明計算の流れ

*1 京都大学工学部教授 *2 京都大学大学院

*3 大林組設備設計部長 *4 同設備計画部課長

3. 計算方法

以下に今回開発した計算方法を示す。なお照明計算にあたっては、事前に膜、及び、人工芝などの光学的特性を測定したところ、いずれも完全拡散性に近い特性を有していることが判明したため、計算対象空間は理論上完全拡散空間と見なした。

3.1 ドーム形状の近似方法

検討対象となるドームは、種々の形状のものが想定されるため、今回は複雑な建物形状を三角形の多面体で近似することにした。

すなわち入力された建築データを基に、図2に示すような三角形要素 (E_m) を任意に発生し、その集合体でドームの内部空間を近似する。なお照明計算においては、この E_m を相互反射計算の基本単位とし、さらにこの三角形を4分割した $E_{q_{m,n}}$ を直接照度計算の基本単位としている。

この方法による近似例を図3に示す。

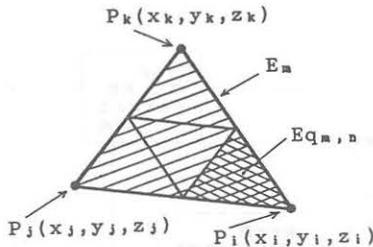


図2 三角形要素

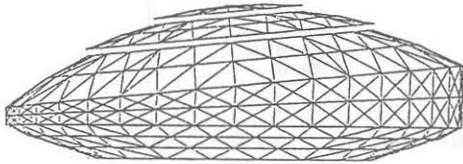


図3 三角形要素によるドームの近似例

3.2 昼光照度と天空輝度の計算

昼光計算において、計算対象面の照度もしくは輝度の絶対値、及び、天空を含めた輝度分布・対比を求めるためには、天候に応じた昼光照度(直射日光照度、全天空照度)と天空輝度の値を決める必要があるが、今回は照度に基づく曇天比の概念を用い、以下のようなステップで計算した。

(1) 太陽位置の計算

1) 月、日: 問題とする日が1年の何日目にあたるか決め N とする。

2) 日赤緯 δ : 次式により求める。¹⁾

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006322 \\ & - 0.405748 \cdot \cos(\omega + 0.153231) \\ & - 0.005880 \cdot \cos(2\omega + 0.207099) \\ & - 0.003233 \cdot \cos(3\omega + 0.620129) \\ & \text{[rad.]} \quad \dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここに、 $\omega = N \cdot 2\pi/366$ [rad.] $\dots\dots(2)$

3) 時刻(中央標準時、24時制) Us [h]より時角 t [rad.]を求める。¹⁾

$$t = \pi/12 \cdot \{ (Us + E - 12) + (L - 135) / 15 \} \text{ [rad.]} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 E は均時差で次式により求める。

$$\begin{aligned} E = & - 0.000279 \\ & + 0.122772 \cdot \cos(\omega + 1.498311) \\ & - 0.165458 \cdot \cos(2\omega - 1.261546) \\ & - 0.005354 \cdot \cos(3\omega - 1.1571) \text{ [h]} \\ & \dots\dots(4) \end{aligned}$$

L はその地点の経度 [°]

4) 太陽位置(太陽高度 hs [rad.]、太陽方位角 A [rad.]):

その地点の緯度 ϕ 、日赤緯 δ 、時角 t より次式を用いて hs 及び A を求める。¹⁾

$$\begin{aligned} \sin hs = & \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos t \\ \cos hs \cdot \sin A = & \cos \delta \cdot \sin t \\ & \dots\dots(5) \end{aligned}$$

(2) 曇天比による天空状態(天気条件)のモデル化と天空重み係数の計算²⁾

計算対象となる気象条件は種々のものが考えられるため、ここでは天空状態を表1のように6つのカテゴリに分け、太陽高度に応じて以下のように定義された曇天比(Cloud Ratio) Cv を与えることにした。

$$Cv = Ed / (Ed + Esh) \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 Ed : 全天空照度 [lx]

Esh : 水平面直射日光照度 [lx]

表1 天空状態と曇天比

天空状態	太陽高度hs		
	80°-40°	40°-20°	20°-0°
澄み切った青空 (強い直射日光有り)	0.15	0.25	0.5
少し霞んだ青空 (直射日光有り)	0.25	0.4	0.8
薄曇り又は曇りの多い晴天 (直射日光有り)	0.4	0.6	0.9
薄日のある曇天	0.65	0.8	1.0
太陽位置周辺が明るい曇天空	0.8	0.95	1.0
太陽位置が確認できない完全曇天空、雨天	1.0	1.0	1.0

また昼光計算においては、理論的に天空を晴天空、中間天空、曇天空、の三タイプに分け、その各々について天空輝度分布の式を与えてきたが、実際にはこの三タイプに明確に分けられないような天空条件の場合もあるため、今回はこのCvをパラメータとして天空状態を図4のようにモデル化し、Cvによって各天空に重み(ウエイト)を与えることにした。すなわち、

Cv ≤ 0.3 の場合 : 晴天空

0.3 < Cv < 0.65 の場合 : 晴天空と中間天空の合成天空

Cv = 0.65 の場合 : 中間天空

0.65 < Cv < 1 の場合 : 中間天空と曇天空の合成天空

Cv = 1 の場合 : 曇天空

とし、

a) 晴天空の重み

$$W_{cl} = 1.857 - 2.857 \cdot Cv \quad \dots\dots(7)$$

ただし、 Cv ≤ 0.3 Wcl = 1.0

Cv ≥ 0.65 Wcl = 0.0

b) 曇天空の重み

$$W_{oc} = -1.857 + 2.857 \cdot Cv \quad \dots\dots(8)$$

ただし、 Cv ≤ 0.65 Woc = 0.0

c) 中間天空の重み

$$W_{in} = 1 - W_{cl} - W_{oc} \quad \dots\dots(9)$$

とした。

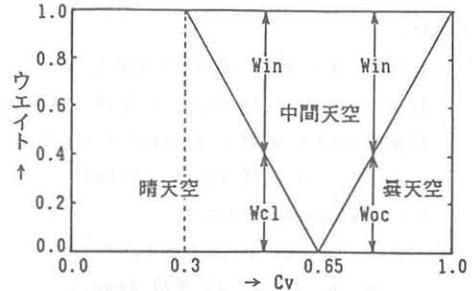


図4 Cvによる天空状態のモデル化

(3) 晴天空の昼光照度と輝度分布の計算

曇天比Cvは(6)式、水平面直射日光照度 Esh、全天空照度 Ed は下式のように表されるため、Cvの値を指定することにより、大気透過率Pvを求めることができる。

そしてPvが求めれば(10)、(11)式によって任意の太陽高度hsのEsh及びEdが計算できる。

$$E_{sh} = 134000 \cdot P_v^m \cdot \sin hs \quad [lx] \dots\dots(10)^{3)}$$

ただし、 m = 1 / sin hs

$$E_d = D \cdot S \cdot 134000 \cdot (1 - P_v^m) \cdot \sin hs + 500 [lx] \quad \dots\dots(11)^{4)}$$

ただし、 D = 0.5 + (0.4 - 0.3 \cdot P_v) \cdot \sin hs

S = 0.6 + 0.4 \cdot P_v

次に図5に示す天空上のP点の晴天空輝度Lclは、

$$L_{cl} = \frac{\phi(h) \cdot f(\xi)}{0.27385 \cdot f(\pi/2 - hs)} \cdot L_{zcl} \quad [cd/m^2] \dots\dots(12)^{5)}$$

となる。

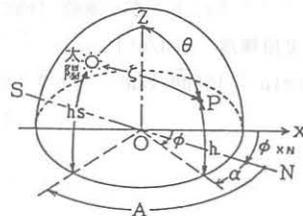


図5 天空モデル

ここに、

$$\begin{aligned}\phi(h) &= 1 - \exp(-0.32 / \sin h) \\ f(\xi) &= 0.91 + 10 \cdot \exp(-3 \cdot \xi) + 0.45 \cdot \cos^2 \xi \\ f(\pi/2-hs) &= 0.91 + 10 \cdot \exp\{-3 \cdot (\pi/2-hs)\} \\ &\quad + 0.45 \cdot \cos^2(\pi/2-hs) \\ \xi &= \cos^{-1}(\sin hs \cdot \sin h \\ &\quad + \cos hs \cdot \cos h \cdot \cos |A-\alpha|) \\ hs, h, \xi, \alpha, A: &\text{単位 [rad.]}\end{aligned}$$

Lzcl: 天頂輝度 [cd/m²]

永田の式⁹⁾を使い、

Pv ≥ 0.75 の場合

$$Lzcl = (2.4 - 1.5 \cdot Pv) \cdot 134000 \cdot f(\pi/2-hs) \cdot \Psi(hs, Pv) / 19.60 \quad [\text{cd/m}^2]$$

Pv < 0.75 の場合

$$Lzcl = (2.4 - 1.5 \cdot Pv) \cdot 134000 \cdot f'(\pi/2-hs) \cdot \Psi(hs, Pv) / 22.07 \quad [\text{cd/m}^2]$$

ここに、

$$\Psi(hs, Pv) = (Pv^m - Pv) / (1 - m)$$

$$m = 1 / \sin hs$$

$$f'(\pi/2-hs) = 0.856 + 16 \cdot \exp\{-3 \cdot (\pi/2-hs)\} + 0.3 \cdot \cos^2(\pi/2-hs)$$

(4) 中間天空の輝度分布の計算

中村・沖他による式⁷⁾を使用し、図5に示す天空上のP点の輝度Linを以下のように表す。

$$Lin = (L1 / L2) \cdot Lzin \quad [\text{cd/m}^2] \dots (13)$$

ここに、

$$\begin{aligned}L1 &= 0.43 \cdot [h + 4.799 + 1.35 \cdot \{\sin(3.59 \cdot h - 0.009) \\ &\quad + 2.31\} \cdot \sin(2.60 \cdot hs + 0.316)] \cdot \exp[-0.563 \cdot \\ &\quad \{(h + 1.059) \cdot (hs - 0.008) + 0.812\} \cdot \xi] \\ L2 &= [0.988 \cdot \{\sin(2.60 \cdot hs + 0.316) + 2.772\}] \cdot \\ &\quad \exp[-1.481 \cdot (hs + 0.301) \cdot (1.571 - hs)] \\ hs, h, \xi: &\text{単位 [rad.]}\end{aligned}$$

Lzin: 天頂輝度 [cd/m²]

$$Lzin = 15000 \cdot \tan^{1.35}(2/3 \cdot hs) + 150 \quad [\text{cd/m}^2] \quad 8)$$

(5) 曇天空の輝度分布の計算

CIE標準曇天空の輝度分布⁹⁾を使い、

$$Loc = \frac{1 + 2 \cdot \sin h}{3} \cdot Lzoc \quad [\text{cd/m}^2] \dots (14)$$

ここに、Lzoc: 天頂輝度 [cd/m²]

$$Lzoc = 9 / (7 \cdot \pi) \cdot 300 \cdot (180 / \pi \cdot hs) \quad [\text{cd/m}^2] \quad 10)$$

ただし、hs: 単位 [rad.]

(6) 全天空照度の計算

図5の任意のP点の天空輝度L(θ, φ)は、式(7)~(9)の重みと式(12)~(14)の天空輝度を用いることによって以下のように表すことができる。

$$L(\theta, \phi) = Wcl \cdot Lcl + Win \cdot Lin + Woc \cdot Loc \quad [\text{cd/m}^2] \dots (15)^2)$$

従って全天空照度Ed [lx]は、

$$Ed = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(\theta, \phi) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \dots (16)$$

となる。

3.3 直接昼光照度の計算

(1) ドーム屋根が閉じている場合 Eic [lx]

まず屋根を構成する単位三角形の膜外部の昼光照度Erを計算する。昼光照度は直射日光照度と天空光照度、地面からの反射光照度の三成分から成り、その各々は以下のようにして求めることができる。

1) 直射日光照度 Esi [lx] (図6参照)

$$Esi = 134000 \cdot Pv^m \cdot \cos i \quad [\text{lx}] \dots (17)$$

ここに、Pv: 大気透過率、

$$m = 1 / \sin h$$

$$\cos i = \cos \gamma \cdot \sin hs$$

$$+ \sin \gamma \cdot \cos hs \cdot \cos(A - \alpha i)$$

A: 図5参照

2) 天空光照度 Edγ [lx] (図7参照)

$$Ed\gamma = Ed \cdot \{(1 + \cos \gamma) / 2\} \dots (18)$$

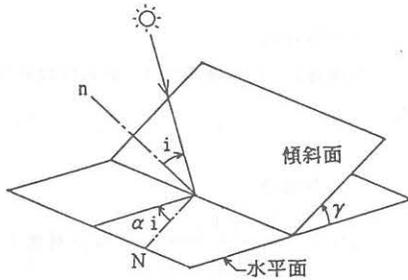


図6 傾斜面の直射日光照射度

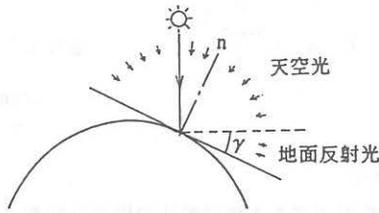


図7 天空光照射度と地面反射光照射度

3)地面反射光照射度 E_g [lx] (図7参照)

$$E_g = (E_d + E_{si}) \cdot \rho_g \cdot \{ (1 - \cos \gamma) / 2 \} \quad \dots\dots(19)$$

ここに、 ρ_g : 地面反射率 = 0.1

したがって、

$$E_r = E_{si} + E_{dy} + E_g \quad \dots\dots(20)$$

この E_r を使うとドーム内部の計算対象点の直接昼光照射度 E_{ic} は、

$$E_{ic} = \int_{\Omega_R} E_r \cdot \tau_R \cdot \cos \beta \cdot d\omega \quad \dots\dots(21)$$

ここに、 τ_R は屋根面実効透過率、 Ω_R は屋根膜面の立体角を表す。

(2)ドーム屋根が開いている場合 E_{Io} [lx]

この場合は直射日光がドーム内に入射するため、ドームが閉じている場合と同じ方法で計算できる直射日光照射度 E_{si} と、開いている部分を通して望める天空による天空光照射度(下式 E_{dI}) の和となる。

$$E_{dI} = \int_{\Omega} L(\theta, \phi) \cdot \cos \beta \cdot d\omega \quad \dots\dots(22)$$

ここに、 $d\omega$ は天空微小部分の立体角、 β は法線と $d\omega$ のなす角、 Ω は開放部の立体角を表す。(図8参照)

$$E_{Io} = E_{si} + E_{dI}$$

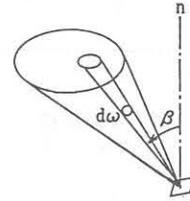


図8

3.4 人工照明直接照射度の計算

人工照明による直接照射度 E_{DA} は、

$$E_{DA} = \sum_{i=1}^n I(\theta) \cdot \cos \phi / r^2 \text{ [lx]} \quad \dots\dots(23)$$

ただし、

- n : 照明器具の個数
- r : 照明器具と計算点の距離 [m]
- $I(\theta)$: 計算点の方向の光度 [cd]
- ϕ : 計算点における受照面の法線と入射光のなす角

3.5 相互反射照射度と全照射度・全輝度の計算

各三角形要素(図2参照)の平均直接照射度から、各三角形要素の間接照射度を光束伝達法によって計算し、これを各三角形の小要素の直接照射度に加え、小要素の全照射度とする。次に完全拡散性の性質を利用し小要素の全照射度より全輝度を求める。

3.6 ボール輝度および背景との輝度対比の計算

(1)視点の座標

ボール観測者の視点の座標を、ドーム内で任意に与える。

(2)ボールの座標

ボールの座標は、打点(B)、落下点(D)の座標と打ち上げ角(θ)および相対的飛距離(R_D)によって与える。ただし、打球は放物線を描くものとする。(図9参照)

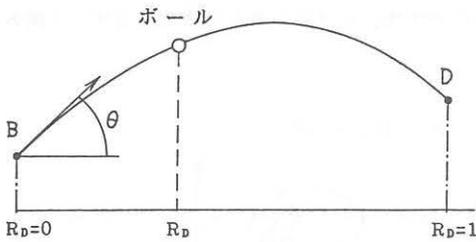


図9 ボールの座標

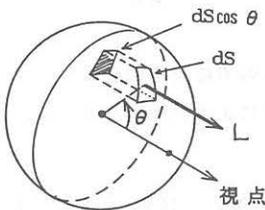


図10 ボールの輝度

(3) ボールの輝度

視点から見えるボールの半球面を5分割し、各分割面の輝度Lをみかけの面積で平均してボールの輝度L_Tとする。(図10参照)

なおボールの反射率は0.75(完全拡散反射)とした。

$$L_T = \frac{\int_{2\pi} \frac{1}{2} \cos \theta dS}{\int_{2\pi} \cos \theta dS} = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} L \cos \theta dS \quad \dots\dots(24)$$

(4) 背景輝度

視点から見たボールの背後に見える要素の輝度を背景輝度L_Bとする。(図11参照)

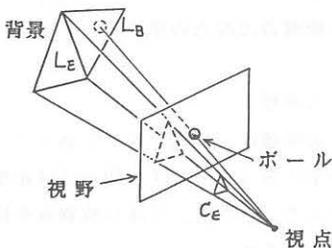


図11 背景輝度と順応輝度

(5) ボールの輝度対比

ボールの輝度L_Tと背景輝度L_Bから輝度対比Cを求める。

L_T > L_Bの場合

$$C = \frac{L_T - L_B}{L_T} \quad (\text{正対比}) \quad \dots\dots(25)$$

L_B > L_Tの場合

$$C = \frac{L_B - L_T}{L_B} \quad (\text{逆対比}) \quad \dots\dots(26)$$

(6) 順応輝度

ボールを視認できる輝度対比の閾値は観測者の眼の順応輝度レベルによって異なるが、今回は視角によって決まる視野内に見える要素の輝度L_Eを、その要素の投射率c_Eによって平均したものを順応輝度L_Aとし、ボールの見え方評価の際の参考値とした。(図11参照)

$$L_A = \frac{\sum L_E c_E}{\sum c_E} \quad \dots\dots(27)$$

4. 計算例

200m級の開閉式ドームをモデルに、今回開発した計算手法を用いたドーム内の輝度分布計算結果の例を図12、図13に示す。ただし両図とも、その計算条件は以下の通りである。

計算対象日時：9月23日 17時30分

曇天比(Cv)：0.30(晴天空)

水平面直射日光照度：6,490 [lx]

全天空照度：1,600 [lx]

方位：ホームベースが南向き

膜透過率：15%

膜屋根の開閉状態：開

人工照明：高圧ナトリウムランプ660W 400台

メタルハライドランプ1000W 400台

反射率：グラウンド 15%

観客席 12%

壁 10%

なお両図中に描かれている大小の円は、その大きさによって輝度の高低を簡易に表したものであって、特

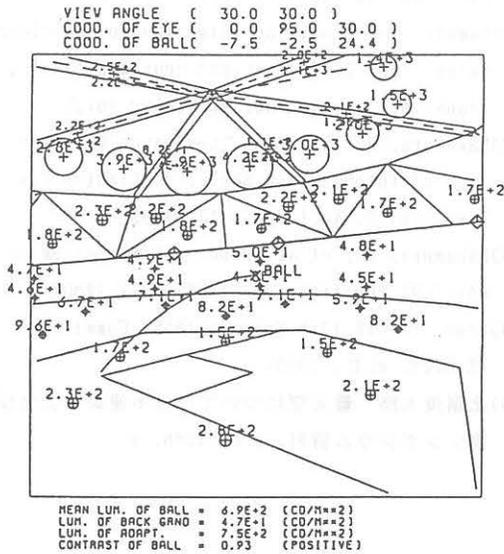


図 1 2 輝度分布計算例 (その-1)

に大きな意味をもつものではない。

またボールの位置は両図とも同じであるが、図 1 2 はこれをライト側内野の観客席から見たような状態での計算結果であるのに対し、図 1 3 はプレイヤーがボールを見上げたような場合の計算結果である。

なお図 1 2、図 1 3ともラインプリンタによる出力例であるが、出力形態としてはこれ以外にX-Yプロッター、エンジニアリングワークステーションを使用した照度分布・輝度分布のカラーディスプレイ方式などを選択することも可能である。

5. 薄暮時のボールの見え方の解析

図 1 2、図 1 3は、初秋の晴天の場合の薄暮時における計算結果でもあるが、もう少し計算時間範囲を長くとり、膜屋根が閉、及び、天候が曇天の場合も含めて、ボールの輝度対比(C)を計算してみると図 1 4 になる。

筆者らの簡易な実験によれば、ボールを視認できるためにはその輝度対比が0.15以上必要であることが確認されているが、図 1 4では膜屋根が開いている場合に、この条件を満足しない時間帯が存在することが分かる。すなわち晴天の場合には、17時30分前後がこれに該当し、特に17時30分頃にはボールの輝度対比が殆ど0となり、ボールを見失う恐れが多分にあることを示している。したがってこのような場合には、高いフライ専用の、ボールの輝度対比を高くするため

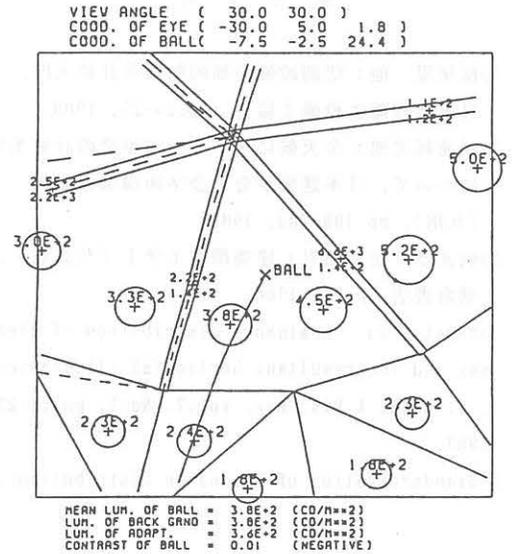


図 1 3 輝度分布計算例 (その-2)

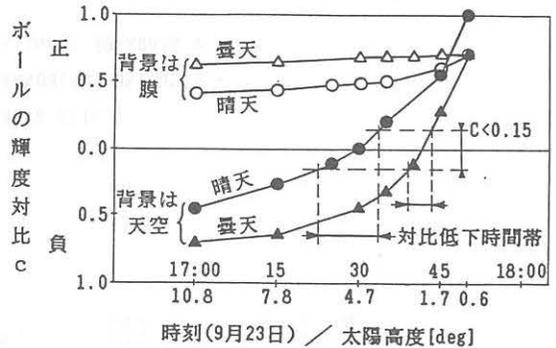


図 1 4 薄暮時のボールの輝度対比の変化

の人工照明設備等の付与が必要となることを示唆しているといえよう。

6. おわりに

以上本研究は、曇天比という概念を導入し、これによって日光光源の特性を表す新しい考え方に基づき、かなり詳細な日光計算を行っているのが最大の長であるが、これによってより実情に近い状態で開閉式ドームの光環境を予測できるようになったと思われる。

しかしながら今後は、実際のドームでの基礎的なデータ収集などによって、輝度対比とボールの見え方の関係等、理論面でまだ不透明な部分を補っていくことが必要と思われる。

参 考 文 献

- 1) 松尾陽 他：空調設備の動的熱負荷計算入門，日本空調衛生設備士協会、pp.24-25, 1988.
- 2) 松浦邦男他：全天候に対する昼光照度の計算条件について，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.199-200, 1989.
- 3) 例えば 松浦邦男：建築環境工学 I（改訂版），朝倉書店，p.78, 1988.
- 4) Nagata, T: "Luminance distribution of clear sky and the resultant horizontal illuminance", J. Light & Vis. Env. Vol.7, No.1, pp.23-27, 1983.
- 5) Standardization of luminance distribution on clear skies, Pub. CIE No.22 (TC-4.2), 1973.
- 6) Nagata, T: "Luminance distribution on clear skies, Part 2. Theoretical consideration", Trans. A.I.J., No.186, pp.41-50, 1971.
- 7) Nakamura, H., et al.: "Luminance Distribution of Intermediate Sky", J. Light & Vis. Env., Vol.9, No.1, pp.6-13, 1985.
- 8) Nakamura, H., et al: Proc. CIE Symposium on DAYLIGHT (Berlin), pp.51-58, July 1980.
- 9) Proc. of CIE 13th Session 1955, Committee (E-3.2), P. II, 1955.
- 10) 比嘉俊太郎：曇天空について，日本建築学会光環境シンポジウム資料，p.6, 1988. 4.

A STUDY OF LIGHTING CALCULATION METHOD AND
LIGHTING ENVIRONMENT ANALYSIS IN A DOME
WITH RETRACTABLE ROOF

Kunio MATSUURA *1
Yoshiaki UETANI *2
Tomoko IWATA *2
Taisei HORI *3
Mitsuru SAITO *4

SYNOPSIS

We have to predict exactly the distribution of illuminance or luminance which is contributed by daylighting and artificial lighting in order to design optimum lighting environment for players and guests in a dome with retractable roof.

However it is very difficult to calculate realistically the daylight distribution in this dome. Then this paper shows a new daylight calculation method using cloud ratio to indicate the characteristics of some sky conditions.

Finally using the computer program which utilizes this method, the visibility of a flying baseball in a model dome is analyzed by calculating the luminance contrast.

*1 Professor, Faculty of Engineering, Kyoto University

*2 Graduate Student, Faculty of Engineering, Kyoto University

*3 General Manager of Facilities Design Department, Ohbayashi Corporation

*4 Manager of Building Services Development Department, Ohbayashi Corporation