

アトリウム内の光環境評価へのCG技術の応用

尊田 嘉之* 樋口 作夫* 北村 由美子* 大柿 聡**
*旭硝子中央研究所 **旭硝子アメニテック

近年、アトリウムに代表されるガラスを多用した建築物が、自然光による解放感、明るさ感をもたらす快適性の追及を理由に増加している。アトリウム空間の光環境を事前に予測する手段として光環境解析がある。本報は信頼性と実用性を考慮した光環境解析手法すなわち、(1)環境支配要因の忠実なモデル化、(2)形状複雑性への十分な対応、を可能とした解析手法を提案するものである。本手法はアトリウムに限らず汎用的な室内光環境解析に適用可能である。更に、本手法の複雑形状を有する実際のアトリウムへ適用事例、CGアニメーションへの展開についても報告する。

ANALYSIS ON LUMINOUS ENVIRONMENT IN THE ATRIUM

Yoshiyuki Sonda* Sakuo Higuchi* Yumiko Kitamura* Satoshi Ohgaki**
*Research Center Asahi Glass, **Asahi Glass Amenitec
1150, Hazawa-cho, Kanagawa-ku, Yokohama 221, Japan

Recently the construction of the atrium is very popular, because the atrium gives us high amenity with natural light. The luminous environment in the atrium is settled by some factors, such as weather, shape of the atrium, and optical efficiency of walls. So it is necessary for the pursuit of accuracy to reflect these factors to the numerical method. Still more, because the atrium has very complicated shape generally, it is required for the numerical method to be applicable to complicated shape. This paper will present a new method for analysis of luminous environment in the atrium, and some applications to the actual atrium with this new method will be mentioned, too.

1はじめに

近年は、ガラスを多用したアトリウム建築の増加に見られるように、自然光を積極的に取り込みより快適な光環境を求める風潮にある。アトリウム内の光環境を事前に予測する技術として光環境解析がある。これは光源より発せられた光が解析空間内部でいかに振舞うかをシミュレーションするものであり、その技術領域は最近、進歩の著しいCG技術に通ずるものがある。

アトリウム内の光環境は天候状態、アトリウム形状、及び壁面光学性能により定まる。したがって、これら環境支配要因を光環境解析手法に反映させる事は、解析精度を追及する上で不可欠である。また一般的にアトリウムは形状複雑性に富む例が多く、解析手法がこの点に十分に対応していなければ、実用的であるとは言い難い。

本報では、以上のような背景を踏まえて、

- (1)環境支配要因の忠実なモデル化、
- (2)形状複雑性への十分な対応、

を考慮した光環境解析手法を提案する。採光概念の時代変化に伴い解析手法には、より高度な技術が要求されているが、本報はこの辺りを大いに意識したつもりである。勿論、本手法はアトリウムに限らず汎用的に室内光環境を評価することが可能である。更に本手法を複雑形状を有する実際のアトリウムに適用した事例を紹介する。

2アトリウムまわりの光環境

2.1環境支配要因

図1に示すように、アトリウム内の光環境を支配する要因は3つある。即ち、それらは、天候状態、アトリウム形状、そして壁面光学性能である。

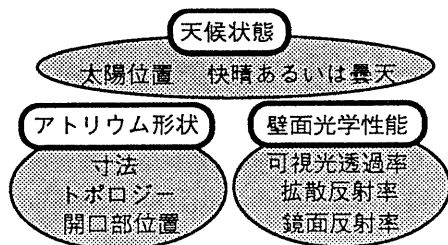


図1 環境支配要因

2.2光の分類

光は自然光と人工光とに大別される。本報は自然光に関する定量化手法を提案するものであるが、本質的には両者を区別する意図は無い。全ての自然光の光源は太陽であるが、アトリウムへの到達形態は様々である。図2に示すように、アトリウム内に入る自然光は直達光、天空光、地面反射光、更には周辺建築物からの反射光に分類される。当然、アトリウムの光環境解析を行う場合、これらの採光形態の違いに対応できることが望まれる。

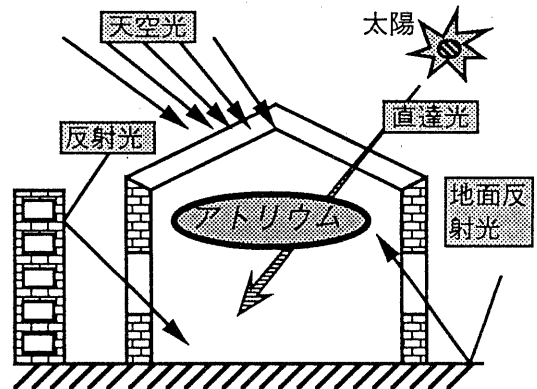


図2 採光形態の分類

2.3壁面間相互反射

アトリウム壁面に到達した光はそこで全て吸収されるのではなく、壁面光学性能に応じて反射されて他壁面に到達する。即ち、壁面間の相互反射が生ずるが、これもアトリウム内の光環境を形成する重要な要素である。本手法はCGの世界では既にポピュラーになったラジオシティ法の考え方を導入して、壁面間相互反射を定量化している。

3計算原理

以下、アトリウム内の光環境を定量的に捉える本手法の計算原理について述べる。

3.1環境支配要因のモデル化

3.1.1天候状態の設定

天候状態としては、快晴日と曇天日を想定している。天空の輝度分布に関しては一様天空の場合とCIE標準曇天空に対応可能である。快晴日の場合、太陽位置が問題となるが計算対象時刻（月、

日、時、分) 及びアトリウム所在位置 (緯度、経度) を入力することにより、式(1) - (3)で算出する。

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad (1)$$

$$\sin A = \cos \delta \cdot \sin t / \cos h \quad (2)$$

$$t = 15 \{T + E + (L - 135) / 15\} - 180 \quad (3)$$

ここで、 ϕ :緯度(度)、 δ :赤緯(度)、 t :時角(度)、 T :中央標準時(hour)、 E :均時差(hour)、 L :経度(度)である。また太陽光線ベクトルは式(4) - (6)で与えられる。

$$l = -\cos h \cdot \cos A \quad (4)$$

$$m = \cos h \cdot \sin A \quad (5)$$

$$n = -\sin h \quad (6)$$

ここで、 l, m, n :太陽光線ベクトルのxyz成分、である。

3.1.2 アトリウム形状のモデル化

図3に示すようにアトリウムを構成する壁面をCADによるサーフェスモデルで構築する。この際、各サーフェスの向きを、必ず解析空間方向(室内方向)に定めることで、太陽光線ベクトルに対する向きを判定することができる。

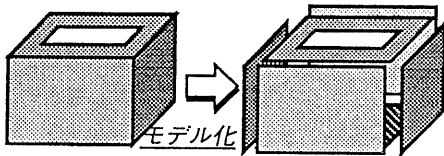


図3 サーフェスモデル

更に、サーフェスモデルは対応する壁面の光学性能に応じて分類される。この分類をCADのレイヤー機能を用いて行なう。図4にサーフェスモデルの分類の様子を示す。

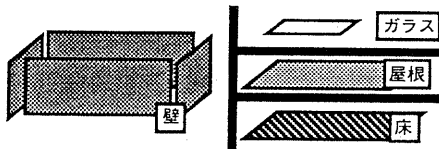


図4 サーフェスモデルの分類

3.1.3 壁面光学性能の設定

ここで指す壁面光学性能とはRGB別の可視光透過率、可視光拡散反射率、可視光鏡面反射率である。これらの性能値は3.1.2で述べた各サーフェスモデルに割り付けられる。図5に壁面光学性能を示す。

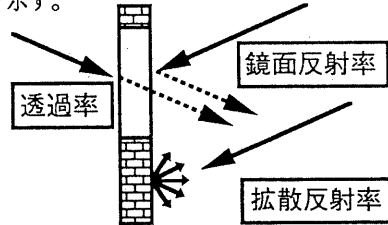


図5 壁面光学性能

3.2 メッシュ生成

本手法はポイントサンプリングにより、室内光環境を評価するものである。このためサンプリング点をあらかじめ生成する必要がある。ここでは、3.1.2で示したサーフェスモデルを3角形分割することにより、サンプリング点を得ている。以下、図6に示すように分割された個々の3角形を要素、3角形の頂点を節点と称する。解析は各節点ごとに行なわれ、3角形内部の値は3節点により補間される。ポイントサンプリングの利点としては、

- (1)メッシュ生成密度をコントロールすることにより解析精度を自由に設定できる。
- (2)光環境の変化の大きさに応じて局所的にメッシュを密度をコントロールすることにより効率の良い解析が可能である。
- (3)解析結果をそのままGWSのハードウェアレンダリングに適用することが可能である。したがってCGやアニメーションへの展開が容易である。

等が挙げられる。

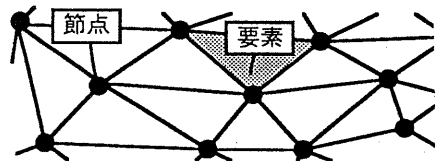


図6 要素と節点

3.3 直達光の計算

3.3.1 直達光の影による要素再分割

直達光はアトリウム内にシャープな影を生成する。すなわち、照度分布が影の境界部において非連続的になるために、単純なポイントサンプリングでは直達光による影を表現できない。本手法ではオイラーオペレータ^[11]を用いた集合演算により要素を再分割することによってこの点に対処している。具体的には、以下のプロセスを施す。

- (1) 3.1.2 で示したサーフェスモデルのうち不透過性のものを、太陽光線ベクトル方向に沿って要素へ平行投影する。
- (2) 投影されたサーフェスモデルと要素との集合演算により、要素を積の部分と、差の部分に分ける。
- (3) 積、あるいは差の部分が3角形でなければそれらを3角形に分割する。

以上の操作により、影の境界部では同一座標上にサンプリング点が2つで存在することとなり、一方に日陰の情報、もう一方に日向の情報を付加することが可能になる。図7に要素の再分割の様子を示す。

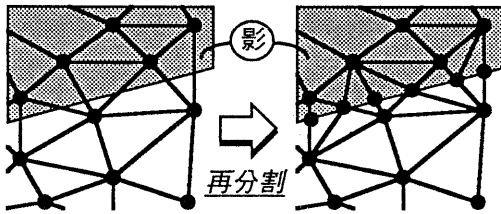


図7 要素の再分割

3.3.2 直達光照度の計算

節点における直達光照度計算は、他壁面との遮蔽判定により行なう。遮蔽判定は、節点より太陽方向へ伸ばした無限半直線と他壁面との交差判定に帰着される。この様子を図8に示す。

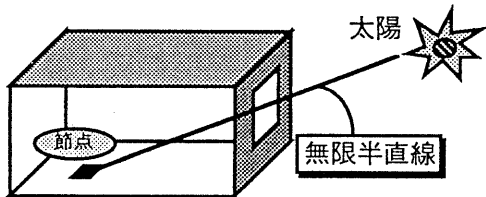


図8 遮蔽判定

節点における直達光照度は式(7)で与えられる。

$$E_d = E_{dn} \cos \theta_2 \prod_{i=1}^n t_i(\theta_i) \quad (7)$$

ここで、 E_d :節点における直達光照度、 E_{dn} :法線面における直達光照度、 $t_i(\cdot)$:透過性壁面の入射角別可視光透過率、 θ_1 :透過性壁面への直達光入射角、 θ_2 :節点への直達光入射角、 n :節点を遮る透過性壁面の総数である。なお透過性壁面への入射角別透過率を入射角特性 $t_i(\cdot)$ を式(8)で近似する^[2]。

$$t_i(\theta) = 3.4167 \cos \theta - 4.3890 \cos^2 \theta + 2.4948 \cos^3 \theta - 0.5224 \cos^4 \theta \quad (8)$$

3.4 天空光の計算

3.4.1 形態係数の計算

図9に示すように開口部より室内へ入る天空光は評価点より開口部を見込む立体角により定まる。

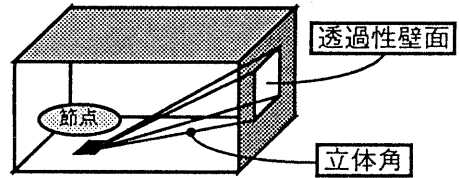


図9 節点への天空光

長方形開口部に直交あるいは平行な位置関係にある評価点での天空光照度は解析的に求められることが知られている^[13]。しかし、一般のアトリウム空間は形状複雑性に富むため、この手法をそのまま利用することはできない。したがって、形態係数を精度良く近似する手法が要求される。本手法は図10に示すような位置関係にある節点の要素に対する形態係数を式(9)で近似する^[14]。

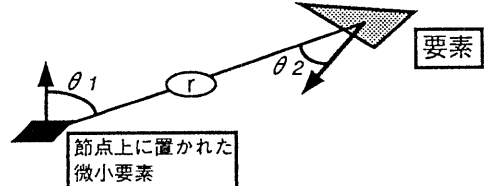


図10 形態係数の近似

$$dF = dA_1 \cos \phi_1 \cos \phi_2 / (\pi r^2 + A_2) \quad (9)$$

ここで、 dF :節点の要素に対する形態係数、 dA_1 :節点上に置かれた微小要素の面積、 A_2 :要素の面積、

θ_1 及び θ_2 :図10参照、 r :要素と節点上に置かれた微小要素との間の距離、である。

3.4.2 天空光照射度の計算

節点における天空光による照度を前述の形態係数を用いて求める。天空輝度分布として、一様天空とCIE標準曇天空を想定した場合の2通りについて述べる。

一様天空、CIE標準曇天空における節点での天空光照射度 E_s は、式(10)、式(11)で与えられる。

図11に天空光照射度計算の概念を示す。

$$E_s = \int_S \frac{L_{\text{uni}} \cos \xi \cdot f(\delta) \cdot r^2 \sin \theta d\theta d\phi}{r^2} \quad (10)$$

$$E_s = \int_S \frac{L_z \{(1+2\cos\theta)/3\} \cdot \cos \xi \cdot f(\delta) \cdot r^2 \sin \theta d\theta d\phi}{r^2} \quad (11)$$

ここで、 L_{uni} :一様天空における天空輝度、 L_z :CIE標準曇天空における天頂輝度、 θ, ϕ :天空上に置かれた微小要素の位置を示すパラメータ(図11参照)、 δ :天空光の透過性壁面に対応する入射角、 ξ :節点上の微小要素の向きを示すパラメータ(図11参照)、 $f(\cdot)$:入射角別可視光透過率、 S :節点より透過性壁面を見込む立体角が天空より切り取る領域、 r :天球の半径、である。

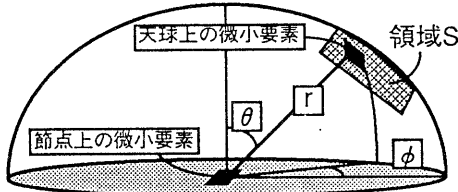


図11 天空光計算の概念

ここで式(10)を式(12)へ、式(11)を式(13)に各々変形する。

$$E_s = \int_S \frac{\pi L_{\text{uni}} \cdot f(\delta) \cdot \cos \xi \cdot r^2 \sin \theta d\theta d\phi}{\pi r^2} \quad (12)$$

$$E_s = \int_S \frac{\pi L_z \cdot \{(1+2\cos\theta)/3\} \cdot f(\delta) \cdot \cos \xi \cdot r^2 \sin \theta d\theta d\phi}{\pi r^2} \quad (13)$$

節点上の微小要素と天空上に置かれた微小要素間の形態係数が式(14)で表せることに着目し、式(12)、式(13)を離散化すると式(15)、式(16)が得られる。図12に離散化の概念を示す。

$$F = \frac{\cos \xi \cdot r^2 \sin \theta d\theta d\phi}{\pi r^2} \quad (14)$$

$$E_s = \sum_{i=1}^n \pi \cdot L_{\text{uni}} \cdot F_i \cdot t_i \cdot \text{Flag}_i \quad (15)$$

$$E_s = \sum_{i=1}^n \pi \cdot L_z \cdot \{(1+2\cos\theta)/3\} \cdot F_i \cdot t_i \cdot \text{Flag}_i \quad (16)$$

ここで、 F_i : i 番目の要素の節点に対する形態係数、 Flag_i : i 番目の要素が節点より可視であり、かつ上方にあり、かつ透過性壁面に属する場合1、それ以外は0となるフラグ、 t_i : i 番目の要素での入射角別可視光透過率、 θ :節点より要素の重心へ延ばしたベクトルとZ軸とのなす角(図12参照)、 F :節点に対する要素の形態係数、である。

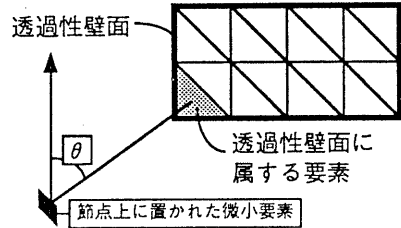


図12 離散化の概念

3.5 地面反射光の計算

図13に示すように、節点における地面反射光照射度も、天空光同様に節点より透過性壁面を見込む立体角により定まる。

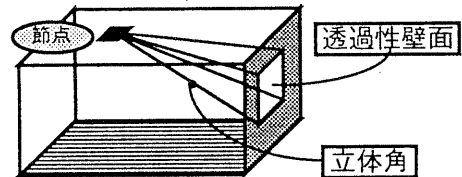


図13 節点への地面反射光

ただし、ここでは地面での反射を完全拡散と仮定している。節点における地面反射光による照度 E_g は式(17)で与えられる。図14に地面反射光照射度計算の概念を示す。

$$E_g = \int_G \frac{L_{\text{grd}} \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cdot f(\delta) dA}{r^2} \quad (17)$$

ここで、 L_{grd} :地面での完全拡散反射による輝度、 ϕ_1, ϕ_2 :図14参照、 r :地面上に置かれた微小要素と節点上に置かれた微小要素間の距離、 $t(\cdot)$:入射角別可視光透過率、 δ :地面反射光の透過性壁面への入射角、 dA :地面上に置かれた微小要素面積、 G :節点より透過性壁面を見込む立体角が地面から切り取る領域、である。

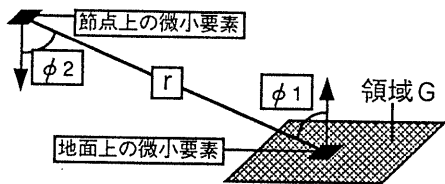


図14 地面反射光計算の概念

ここで、式(17)を式(18)に変形する。

$$E_g = \int_G \frac{\pi L_{grd} \cdot (\delta) \cdot \cos \phi_1 \cos \phi_2 dA}{\pi^2} \quad (18)$$

更に式(14)に着目して式(18)を離散化して式(19)を得る。記号は天空光計算に準ずる。ただしFlag_iは可視かつ下方のとき1、それ以外は0。

$$E_g = \sum_{i=1}^n \pi \cdot L_{grd} \cdot F_i \cdot t_i \cdot Flag_i \quad (19)$$

地面での完全拡散反射による輝度は、式(20)で与えられる。

$$L_{grd} = \frac{\rho E_{grd}}{\pi} \quad (20)$$

ここで、L_{grd}地面反射輝度、E_{grd}水平面全天空照度、ρ:地面の完全拡散反射率、である。

3.6 壁面間相互反射の計算

図15に示すような壁面間の相互反射を、漸進的ラジオシティ法⁽⁵⁾により解く。

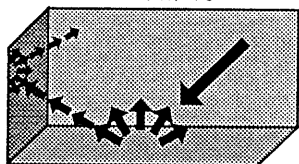


図15 壁面間相互反射

ここでは、壁面での反射を完全拡散反射と仮定して簡易に解いている。本来、壁面での反射には拡散反射、鏡面反射、そして両者の混在する反射の3タイプがあり、当然これらの反射モデルを解析手法に反映させることが、本手法の急務となっている。

以下、壁面での反射を完全拡散反射と仮定した場合の壁面間相互反射計算式を示す。

まず、3.3-3.5で示した計算方法で定量化された節点での直達光照射度、天空光照射度、地面反射光照射度を加算して、節点での全照度とする。任意

の要素の全照度はそれを構成する3節点の平均とする。すなわち、式(21)で与えられる。

$$E = \frac{E_0 + E_1 + E_2}{3} \quad (21)$$

ここで、E₀:第0節点での照度、E₁:第1節点での照度、E₂:第2節点での照度、E:要素での照度である。

相互反射の計算に入る前に、各要素の未放出ラジオシティを、式(21)で求めた全照度にセットする。ある要素の相互反射による他の要素への寄与分は式(22)で与えられる。

$$E_1 = \rho E_2 F \quad (22)$$

ここで、E₁:要素0からの相互反射による要素1での照度、E₀:要素0での照度、ρ:要素0での可視光反射率、F:形態係数、である。

未放出ラジオシティの大きい要素より順次、他要素への寄与分を式(22)で算出し、未放出ラジオシティに加算する。放出し終えた直後に、その要素の未放出ラジオシティを0とする。未放出ラジオシティの最大値が一定以下になったら反射計算を終える。なお漸進的ラジオシティ法の詳細に関しては文献⁽⁵⁾を参照。

4 適用事例

実際に本手法を適用した事例2ケース(居室モデル、N-アトリウム)を紹介する。

4.1 居室モデル

図16に形状モデル、図17に3角形メッシュを示す。このとき要素数は1480、節点数は1794であった。更に快晴日、曇天日を想定して解析した場合の解析結果を図18、図19に示す。

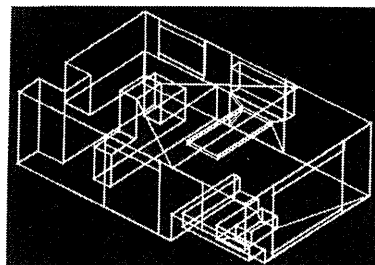


図16 形状モデル(居室モデル)

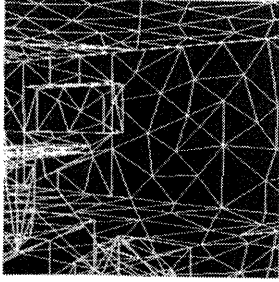


図17 メッシュ (居室モデル)

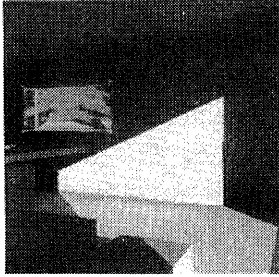


図18 晴天日解析結果 (居室モデル)

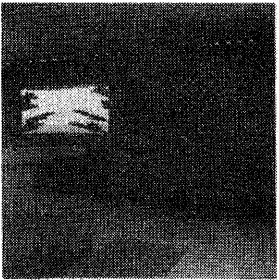


図19 曇天日解析結果 (居室モデル)

4.2 N-アトリウム

図20に形状モデル、図21に3角形メッシュを示す。このとき要素数は10080、節点数は7516であった。更に快晴日、曇天日を想定して解析した場合の解析結果を図22、図23に示す。

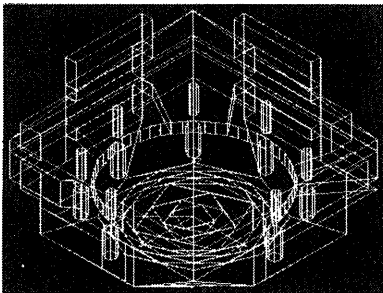


図20 形状モデル (N-アトリウム)

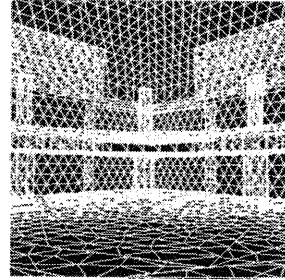


図21 メッシュ (N-アトリウム)

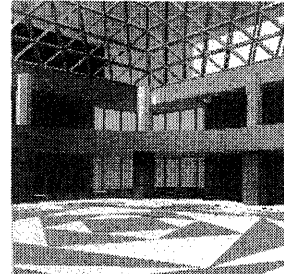


図22 晴天日解析結果 (N-アトリウム)

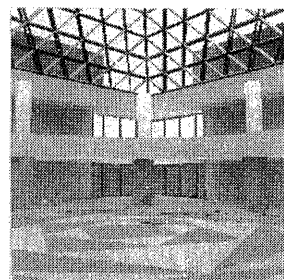


図23 曇天日解析結果 (N-アトリウム)

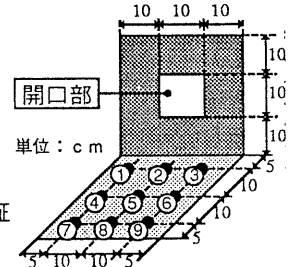
5 解析精度の検証

5.1 形態係数計算の精度検証

解析手法の精度検証のために、形態係数に関して解析解との比較について述べる。3.4、3.5で述べたように、天空光照度、地面反射光照度を形態係数を用いて定量化する。したがって、形態係数計算の近似精度が、解析精度を左右する。ここでは、明らかに解析解が分かっている場合について近似解との比較を行った。

図24に示すような位置関係にある評価点か

図24 計算精度検証のための評価点



開口部への形態係数について、解析解と近似解の比較を図25に示す。

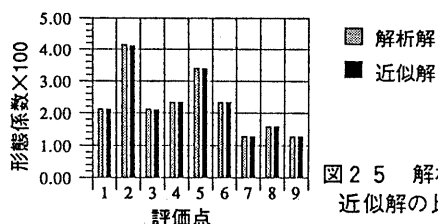


図25 解析解と近似解の比較

図25からも明かなように、解析解と近似解は良好な一致を見せており、形態係数計算の精度は十分と思われる。

5.2 光環境解析精度の検証

光環境解析自体の精度検証を行うべく、人工天空室を利用したBOX実験との対比を進めている。人工天空室は、CIE標準曇天空の輝度分布を人工的に再現する室内空間である。人工天空室内に置かれた開口部付のBOX内の照度分布を実測し、解析結果との対比する。理想を言えば、屋外にBOXを置くのが望ましいが、輝度分布の安定性、再現性を考えると人工天空室を利用した方が効率的に実験を進めることができる。紙面の都合上、人工天空室を利用した実験との対比については別の機会でご報告させていただきたい。

6 CGアニメーションへの展開

アトリウム内の光環境を評価する指標として、単なる照度分布だけでは十分とは言えない。アトリウムの面白さとして、太陽の位置変化による影の変化、雲が太陽を遮る際のうつろい、等の外界の変化への追従性が挙げられる。また人間は天井部を見上げたり、歩き回るなかで、アトリウムの解放感を実感できる。言うなれば、時間軸がアトリウムの快適性に密接に関係しているわけである。時間軸をも取り込んだ評価手法が、アトリウム内の光環境を捉える上で不可欠となるであろう。この意味でアニメーション技術は注目される。

幸い本手法は、3角形メッシュを利用したポイントサンプリングにより、光環境解析を行なっている。したがってGWSのハードウェアレンダリン

グ機能を用いて、解析結果に基づくリアリティの高いCGアニメーションを作成することが容易である。なおアトリウム空間の形状複雑性が増すと、GWSでのリアルタイムアニメーションが難しくなるため、光ディスク装置等の活用を考えている。

7 まとめ

本報は採光概念の時代変化を踏まえて、新たな光環境解析手法を提案した。本手法は、解析精度の信頼性、実用性の追及を念頭に置き、

- (1)環境支配要因の忠実なモデル化
- (2)形状複雑性への十分な対応

を狙って開発された。更に、複雑形状を有する実際のアトリウムに、本手法を適用した事例を紹介した。今後は、

- (1)CGアニメーションへの更なる展開
- (2)CIE標準晴天空への対応
- (3)周辺建築物の影響の定量化
- (4)鏡面反射をも含めた相互反射計算
- (5)複雑形状建物での実験との対比

に注力する予定である。

謝辞

本報告中のN-アトリウムの解析にあたり、竹中工務店の皆様より多大なご協力を戴いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] M: Mantyla, R. Sulonen: *GWB-A Solid modeler with Euler Operators*, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.2, No.7, 1982, p.17.
- [2] 宇田川光弘: *パソコンによる空気調和計算法*, オーム社, 1986, p.100.
- [3] 松浦邦男: *建築環境工学 1-日照・光・音-*, 朝倉書店, 1988, pp.96-99.
- [4] John R. Wallace, Kells A. Elmquist, Eric A. Haines: *A Ray Tracing Algorithm for Progressive Radiosity*, Computer Graphics, Vol.23, No.3 1989, pp.315-324.
- [5] Choen, Michael F., Shenchang Eric Chen, Jhon R. Wallace, Donald P. Greenberg: *A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation*, Computer Graphics, Vol.22, No.3, 1988, pp.75-84.