照明のモデリング効果に関する調査研究†

関西支部照明環境評価法研究委員会
モデリング分科会

主 査 野 口 透*

1. ま え が き

本学会関西支部では、昭和51年に「照明環境評価法研究委員会（松浦邦男委員長）」を発足させ、昼光利用技術分科会（松浦邦男主査）、およびモデリング分科会（野口透主査）に分かれて調査・研究を行なった。モデリング分科会は、数回の実験研究を含む12回の委員会を開き、昭和54年度に活動を終了した。

当分科会では、照明設計に適用可能なモデリング技術を開発することを目的として、文献調査、実験研究、実例調査などの基礎データを収集する活動を行ない、一応の基礎的な成果を得たので報告する。

2. 分科会委員（所属は発足当時）〔本資料執筆担当項目〕

主 査 野口 透（京都大学）〔1.～3., 9.〕

幹 事 江島 義道（同上）〔6.〕

委 員 金関 勇（三菱電機）

金谷 末子（松下電器）

川中 義郎（日本電池）

木内 隆子（京都大学）

渋谷 寅三（関西電気保安協会）

田淵 義彦（松下電工）〔5., 6., 8.〕

鶴谷 幸雄（小糸工業）

中根 芳一（大阪市立大学）

中野 刀子（岐阜大学）

西村 武（京都工芸繊維大学）〔6.〕

野口 太郎（関西大学）〔4., 7.〕

藤村 勉（大阪府立大学）〔6.〕

増田 通敏（国立京都博物館）

松浦 邦男（京都大学）

吉野 禮一（東芝電材）

協力者 伊藤 克三（大阪大学）〔7.〕

五十鈴川浩児（大阪府立大学）〔6.〕

佐藤 隆二（大阪大学）〔7.〕

永井 久（京都大学）

3. 照明設計要素としてのモデリング

モデリングは、光によって対象物の立体感・実体感・質感が表現された状態である。好ましいモデリングを実現することは、良好な視環境の形成に不可欠なものであり、とくに必要な分野として、応接間などの対話の場、店舗などの展示の場、あるいは舞台・スタジオなどの映像の場が挙げられる。しかし、最後の映像の場では、特殊な効果を意図した照明がなされる場合が多く、芸術的な面が強いので本研究の対象から除外した。

モデリングの良否は、快適な照明環境を得るための所要照度に影響し、モデリングが良好であれば比較的低照度でも快適な環境が形成できる。省エネルギーに関連して昼光の利用とか、全般・局部併用照明などが推奨されているが、そのためにモデリングが劣化することもあるので、設計に当たっては十分な配慮が望まれる。

モデリング効果には、光源の光色や輝度、見かけの大きさ、器具配光のほか、対象と背景の輝度比などの要素が深く関連する。また人物のモデリングでは、これを見る側からは良好であっても、見られる側からは極端なグレアを感じる場合も生じるので注意が必要である。

4. 各分野におけるモデリングの考え方

近年、事務所のような作業空間においてもモデリングの重要性が指摘され、また、店舗、美術館、博物館、舞台、写真、映画、テレビなどの各分野においては当然重要なものとされている。しかし、いずれの分野においても、望ましいモデリング効果を得るための設計法や、その評価法は確立されておらず、それぞれの現場で個別的、経験的に処理されているのが現状である。

4.1 展 示 の 場

美術館、博物館、店舗などの分野では、立体的な展示物（彫刻などの美術品や商品）を対象として、これらを制作意図に沿って正しく、あるいは魅力的に見せることが主な目的である。彫像のモデリングについては、美術鑑賞を目的とした写真を用いた評価の研究¹⁾があり、次のように要約できる。

† Investigations about the Modeling Effect for Lighting

* 摂南大学工学部

Toru Noguchi

(1) 前上方からの拡散光が最適である。

(2) 次いでよいのは、前上方よりの直射光、さらにこれに側方光の加わったものがこれに次ぐ。

(3) 明らかに悪いのは、左右側方光各々、この両者が同時に当たる場合、さらにこれに下方光が加わる場合、上方光と下方光が同時に当たる場合などである。

最近の実例としては、東大寺大仏殿の施設報告がある²⁾。これは大仏殿の屋根葺き替え工事中の照明設備で、堂内の宗教的ふん囲気を保ち、信仰対象としての大仏の拝観のために、大仏の顔のモデリングに留意して、投光照明が設計された。左右2対の拡散光源と前方上方からの指向性光源によって目的を達している。

4.2 映像の場

写真、舞台、映画、テレビなどの分野がある。ここでは、映像の演出意図を十分に正しく表現することが照明の役割である。芸術的要素が強く、体系化された照明法や資料は見だしにくい、実例集的な文献がある³⁾⁴⁾。

4.3 対話の場

応接室、会議室、講演会場などにおいて、対話時の人物の顔を「好ましく」見せることを目標にし、従来の視作業性だけを重視した照明に、心理的要素を加味したものである。

光の指向性と拡散性を表わす物理量（モデリングインデックス）の選定、および主観的評価についていくつかの研究が報告されている。これらについては次章で述べる。

最近の実例としては、最高裁判所大法廷および小法廷の施設報告⁵⁾がある。

5. 従来のモデリングの研究

5.1 用語

ここでモデリングに関する用語を定義しておく。

(1) モデリング⁶⁾

立体が立体感を表わすためには、適度の陰影が必要である。「モデリング」という用語^{*}は立体対象の形が光によって表わされている良否を記述するために使われる。立体に対して光が多く方向から入射するとき、すなわち光が過度に拡散性のとき、得られる影は弱く、モデリングは好ましくない。一方、光の指向性成分が過度に強いときは得られる影は強く、やはりモデリングは好ましくない。また、立体の上に生じる影の方向もモデリングに大きな影響を及ぼす。したがって、モデリングの良否は光の方向と拡散性の度合いに依存する。

(2) モデリング効果

「モデリング効果」を、照明によって立体対象の上に生じている明暗の意味で用いることもある。

(3) モデリングインデックス

光の方向と拡散性の度合いを表わすために、簡単な形に

^{*}「電気学会電気専門用語集 No. 3 照明」では、「立体的な対象物に適度な明暗（なめらかな明暗変化とはっきりした陰影）をつけて、立体の形を適切に表現する光の能力、または表現している光の状態」と定義されている。

まとめられたインデックスを、モデリングインデックスと呼ぶことにする。大別すると次の2種類がある。

(a) 対象の立体を定め、その形を規約してその立体上の輝度比で表記する方法。

(b) 光の流れ、すなわち被照点における光の入射の様子を照度の形で表記する方法。

5.2 現在までの、モデリングインデックスとその好ましい値についての研究

主要な研究をまとめて表1に示す⁷⁾。このうち代表的なものについて説明する。

(1) 対象の立体上の輝度比で表記する方法 Moon and Spencer⁸⁾の研究

Moon と Spencer は、立体対象の上における輝度の最大最小の比をモデリングインデックスと考え、Modeling Ratio と名づけた。

Modeling Ratio が2:1以下では平板な感じとなり、10:1以上ではどぎつくなる。2:1が「受け入れられる」範囲であり、このうちでは3:1が「最も好ましい」ことを明らかにした。

Moon らは、対象の立体における明暗の方向の好ましい範囲については言及していない。

(2) Cuttle らの研究¹⁰⁾

Cuttle らは、モデリングインデックスとして、光の方向を表わす「照明ベクトル」と、指向性の光と拡散性の光の比率を表わすための、「ベクトル：スカラー比」を組み合わせたものを用いた。

Cuttle らは、新しいモデリングインデックスを次のように定義した。

(1) 照明ベクトル (Illumination Vector, E)

背中合わせした二つの照度計の出力の差が最大になる受光面の方向（向きは照度の大きいほうから小さいほうへとる）をベクトルの方向とし、出力差を絶対値とするようなベクトルと定義した。

(2) スカラー照度 (Scalar Illuminance, E_s)

空間内の任意の点に置いた小球の表面の照度の平均値と定義される。測定には、たとえばピンポン球のような拡散透過性の球壁に内側に向けて小さい受光器を取り付け、受光感度の角度特性をほぼ円になるような補正した「スカラー照度計」を用いる。

(3) ベクトル・スカラー比 (Vector: Scalar Ratio, $|E|/E_s$)

照明ベクトルの絶対値対スカラー照度の比と定義した。

定義によると、ベクトル：スカラー比の変化する範囲は、0（積分球の内部におけるような無指向性の光の中）から4（暗室内の平行光線の中）までである。

Cuttle らは上記のモデリングインデックスを用いて、人の頭部を対象にして、主観的に好ましいモデリング効果の得られる範囲を明らかにする実験を行ない、次のことを明らかにした。

表 1 モデリングインデックスおよびその好ましい範囲についての従来研究⁷⁾

著 者	発 表 年 (年)	モデリングインデックス	モデリングインデックスの好ましい範囲
Moon, Spencer	1951 ⁸⁾	対象の立体上の最大 対最小の輝度比	2:1~6:1 が「受け入れられる」 3:1 が最良
Hewitt (1)	1965 ⁹⁾	平均鉛直面照度 水平面照度	特定の範囲を設定するに至らなかった。
Hewitt (2)	1965 ⁹⁾	二つの方向の照度 E_φ, E_α の比 (E_φ/E_α) (定義については 3.2.1 参照)	同 上
Cuttle et al.	1967 ¹⁰⁾	{ 照度ベクトル ベクトル: スカラー比	照度ベクトルの方向: 方位 30~120°, 高度 15~45° ベクトル: スカラー比: 1.2~1.5
Fischer	1970 ¹¹⁾	同 上	次の 3 種類のベクトル方向 (方位, 高度) (A): (0°, 45°), (B): (90°, 45°), (C): (-, 90°) のうちでは, 人の顔に対して (0°, 45°) が最も好ましく, 静物に対しては (90°, 45°) が最も好ましかった。 ベクトル: スカラー比は, ベクトル方向 (-, 90°) の場合に ついて, 人の顔に対して約 1.5, 静物に対して約 20 が最も好ま しかった。
阪 口 江 島 永 井	1975 ¹²⁾	同上および Cuttle がその 後 (1971) 言及したインデ ックス	実験は Cuttle et al. (1967) に類似であるが, 指向性用光源 は反射形白熱電球による点光源である。 視対象はマネキン人形を用いている。 好ましい範囲は $\varphi=10\sim40^\circ$ のとき $\alpha=0\sim60^\circ$ $\varphi=50\sim60^\circ$ のとき $\alpha=0\sim45^\circ$ $\varphi=70\sim90^\circ$ のとき $\alpha=-30\sim15^\circ$

(備考)

- (1) Cuttle (1971年)¹³⁾は, 上記モデリングインデックス (1967年) を補足して effective vector ($\sin \beta \cdot E$) あるいは, effective vector: Scalar ratio, また可視半球の平均照度 (average illumination of the visible hemisphere) などを提案し, これらの特徴について検討している。
- (2) 阪口らも, 照明ベクトル, スカラー比のほか, 上記備考(1)の各モデリングインデックスについて論じている。
- (3) 上表のほか, 神阪 (1976) は, 絵画の技法を精査してカゲリ特性を照明モデリングに導入すること, およびこの表記法としての明暗ぼかし指数 (gradation index) を提案した¹⁴⁾。

(1) 照明ベクトルの方向の好ましい範囲

ベクトルの方位が 0° のとき, およびベクトルの方位が 180° のとき, モデリング効果は好ましくなかった。満足すべきモデリング効果は, 方位が $30\sim120^\circ$ の範囲で得られた。

また, 高度に関しては, 方位 0° の場合は高度 $15\sim45^\circ$ の範囲が最も好ましかった。高度 90° は最も好ましくなかった。

(2) ベクトル・スカラー比の好ましい範囲

方位 φ がそれぞれ $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ の場合について, 高度 α を変化させて, ベクトル: スカラー比の好ましい範囲を求めた。次に, 通常の室内では視線の方向は決定することはむずかしいので, 視線があちこちを向いた場合にも適用できるように, これらの図を重ねてベクトル: スカラー比の好ましい範囲を示す図を作成した (図 1)。

なお Cuttle らは, 以上の結果は比較的立体角の大きな光源を用いた照明に適用でき, 点光源による照明については必ずしもあてはまらないとしている。

6. 好ましいモデリング条件を求める実験

5. に述べたように, 従来, 好ましいモデリング条件を求める実験がいくつか行なわれていた。また他に人形の顔を視対象としたモデリングの評価実験も¹²⁾行なわれている。しかしこれらの実験結果は, 必ずしも一致しているわけで

図 1 好ましいモデリングの得られる
ベクトル: スカラー比の範囲

はないので, 実際の人物の顔を対象に再検討のため実験を行なった。

なお実験の詳細の報告は別の機会に譲り, ここでは概要だけ報告する。

照明の場面については, 最も一般性があるものとして会議室での対話の場面を想定した。ただし実験は会議室のモデルルームをつくるのではなく, 実験ブースを作った。ブースは一辺が約 2.4 m の立方体で, 壁面は無彩色 N 5 のカ

カーテンあるいは紙貼りで、前面ののぞき窓を通して内部を観察した。

拡散光は、各稜に 40 W けい光ランプを 2 本ずつ配置した照明設備によって得た。

指向性光源としては、普通形けい光ランプ（白色）のほかに、反射形電球、PAR 形電球を用い、その位置を変えることによって照明ベクトルの方向を変えた。

上述のうち、一稜が約 2.4 m の立方体であること、拡散光は各稜に 2 本ずつ配置したけい光ランプによって得たこと、指向性の光のうけい光ランプを用いた場合についての諸条件が、Cuttle ら¹⁰⁾の実験に近似させた点である。

評定とその尺度化は系列範ちゅう法を用い、さきに江島ら¹²⁾の行なった実験のカテゴリーをさらに改善した。

合計 5 回の実験を行なった。観察対象は人物の顔とした。ただし毎回異なる人物である。

以上の実験によって得られた結果の詳細は別に譲り、大きな傾向として次のことが明らかになった。

(1) モデリングの好ましさは、照明ベクトル E の方向に強く依存する。

(2) $|E| : E_s$ の変化が、モデリングの好ましさに与える影響は E の方向に比べて小さい。

この点は Cuttle¹⁰⁾らの報告と異なった傾向である。

7. 照明施設のモデリング条件の測定結果

実際の事務所ビルにおけるモデリングを調査した。現状では、とくにモデリング効果を考慮した設計は行なわれていないので、現在の標準的な事務所ビルにおける例として高層ビルの測定例を示す。

これは、本委員会のもう一つの分科会である昼光利用技術分科会（松浦邦男主査）による、昼光照明度分布測定結果の一部である。

(1) 測定の概要

測定日時：昭和52年11月19日（木）8：30～15：45

天候：晴れのち曇り

測定場所：大阪市東区 大林ビル12階応接室

平面図を 図 2 に示す。

測定器：Megatron 社 Spatial Illumination Meter (Mark II)

図 2 測定室（応接室）平面図

(2) 昼光による照明ベクトルとスカラー照度の分布

人工照明を消灯して、北側天空光だけによる分布を、図 2 中の I・II・III 列の 15 点で測定した。測定中の天候は安定しており、経時変化は無視してよい。晴天時および曇天時の照明ベクトルの分布を 図 3 (a) および (b) に示す。

ベクトルの方向は水平に近く、大きさは窓際で大きく室内奥で小さい。曇天時よりも晴天時の鉛直方位角（高度）が小さいのは、地表面での直射光の反射の影響と思われる。

(3) 人工光による照明ベクトルとスカラー照度の分布

ルーバおよびカーテンにより昼光をしゃ断し、図 3 (a) の I 列（器具下）、および II' 列（器具中間）の 10 点で測定した照明ベクトルの分布を図 3 (c) に示す。

(4) モデリング効果の評価

同時に測定したスカラー照度を用いて $|E| : E_s$ を求め、モデリング効果を検討した。前記図 1 に示した Cuttle らの提案によるカテゴリーにあてはめてみると、図 4 に示すように分布する。このことから、

(a) 昼光照明だけの場合は、 $|E| : E_s$ が大きく、ほとんど “too harsh（どぎつすぎる）” の領域にあるが、室内奥部分では $|E| : E_s$ が小さく、“preferred（好ましい）” の領域に分布している。晴天時と曇天時とでは顕著な差は見ら

図 3 照明ベクトルの分布図

(a) 昼光だけ（晴天時） (b) 昼光だけ（曇天時） (c) 人工照明だけ

図4 Cuttle らのカテゴリーへの
プロット $|E|:E_s$

れない。

したがって、窓際では昼光だけの照明は、モデリングの見地で好ましくなく、人工照明を併用することが必要である。

(b) 人工照明だけの場合には、照明ベクトルの鉛直方位角が比較的大きく $|E|:E_s \approx 1.2$ でほぼ全体が“Preferred”の領域にある。

8. モデリングを重視した照明設計法の例 (Cuttle らの提案¹³⁾)

前節までに述べられたところに従って、好ましいモデリングの得られる照明設備の実際的な設計に関する研究はなお今後の課題である。

ただし、天井に照明器具が規則的に配置された一般的な照明設備に関して次のような提案がある。

頭上からの照明によるモデリングが好ましくないことは、前記 5.2 にも述べた。しかし現実にはこのような照明が一般的である。したがって少しでも好ましいモデリング効果を得るためには、次のような照明ベクトルおよびスカラー照度の条件にする。

照明器具が普通に配置され、障害物のない部屋でのスカラー照度は、理論的に次の式で与えられる。

$$E_s = E_h (K + 0.5 \rho_f) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

E_h : 平均水平面照度

ρ_f : floor cavity の反射率

K : 照明器具の配光、室指数および室内各面の反射率で定まる定数であり、 K は相互反射理論により、別途に求めて図表を作成しておく。

照明ベクトルは次式で求める。

$$|E| = E_h (1 - \rho_f) \dots \dots \dots (2)$$

したがって、

$$\frac{|E|}{E_s} = \frac{1 - \rho_f}{K + 0.5 \rho_f} \dots \dots \dots (3)$$

計算によれば、 $|E|:E_s$ の値に対して、器具配光よりも ρ_f のほうが強く影響し、

(a) $\rho_f < 0.15$ では、モデリングはどぎつくなる。

(b) $\rho_f \approx 0.15$ の場合、BZ 5～6 の配光のとき好ましいモデリングが得られる。

(c) $\rho_f = 0.25 \sim 0.3$ の場合、BZ 7～10を除いて、ほぼ良好なモデリングが得られる。

(d) $\rho_f \approx 0.35$ の場合、BZ 番号の小さいものでないと、よいモデリングは得られない。

(e) $\rho_f < 0.4$ の場合、モデリングは平板すぎる。

上述のことから、設計に際しては、可能ならば floor cavity, すなわち床や腰板部分の反射率を設定するか、またはこれらの反射率が既定の場合は、floor cavity の反射率を計算した上で、望ましい配光の照明器具を選ぶことが望ましい。

9. 結 び

照明の一要因としての、照明によるモデリングをとり上げ、調査と実験を行なった。本研究では良好なモデリングを与える照明設計の基礎的な問題の調査研究にとどまり、本報は調査事項の報告を主体にまとめた。

照明によるモデリング効果を数量的に把握する試みは、約30年前から行なわれているが、照明分野が多岐にわたり、また評価法が心理効果を含むため問題が複雑になっている。本報を始まりとして今後研究と技術開発の行なわれることが望まれる。

最後に、委員会を通じて終始ご協力を賜ったかたがたに深謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 平山嵩：美術館内彫刻の照明法に関する研究，照学誌 21 (昭12) 140
- (2) 松浦，山口：東大寺大仏殿の照明——大仏さまのモデリング，照学誌 60 (昭51) 168
- (3) さとう：ライティングのデザイン理論，啓学出版 (昭45)
- (4) 大庭三郎：舞台照明，オーム社 (昭51)
- (5) 松田ほか：最高裁判所・新庁舎の照明模型実験および照明設計への展開例について，照学誌 59 (昭50) 129
- (6) CIE Publication No. 29: Guide on Interior Lighting, CIE, Paris (1975)
- (7) 田淵義彦：立体対象に好ましいモデリング効果を得るための照明の所要条件，照学誌 57 (昭48) 14
- (8) Moon, P. and Spencer, D: Modeling with light, Jour. Franklin Institute 251 (1951) 453
- (9) Hewitt, H. et al.: Lighting and the environment, Trans. Illum. Engng. Soc. 30 (1965) 91

- (10) Cuttle, C. et al.: Beyond the working plane, Proc. CIE, P-67.12 (1967)
- (11) Fischer, D.: The European approach to the integration of lighting and air-conditioning, Light. Res. Technol. 2 (1970) 150
- (12) 阪口, 江島, 永井: 立体を好ましく見せるための照明条件に関する研究(1), 照学誌 59 (昭50) 11, および(2) 照

- 学誌 59 (昭50) 19
- (13) Cuttle, C.: Lighting Patterns and the Flow of Light, Light. Res. Technol. 3 (1971) 171
- (14) 神阪 祥: カゲリ特性と明暗ばかし指数を照明モデリングの要素に導入する試案, 照学誌 60 (昭51) 652
- (受付1981年4月3日)

新製品紹介

軽量化と省電力を実現 熱線カット形ビームランプ・ クールビーム®ライト

東京芝浦電気㈱は、明るさを低下させずに消費電力を10%節電し、さらに従来比16% (約50g) の軽量化を実現した熱線カット形ビームランプ「クールビーム®ライト・ワットブライター」を発売した。

ビームランプは、集光性にすぐれ、照射範囲の制御が行ないやすいという特長を有しており、なかでも熱線カット形ビームランプは、被照射物が受ける熱線量が通常のビームランプに比べ約1/2と少ないことから、ショーウィンドーのスポット照明をはじめ、店舗、ホテル、飲食店などのダウンライトなどに広く利用されている。

「クールビーム®・ライト・ワットブライター」は、クリプトンガスを使用しないで、アルゴンガスを高圧で封入して熱損失を低減し、さらに、ランプの反射鏡 (リフレクタ) 特性やレンズのプリズム素子の形状改善などにより、ビーム光束 (明るさ) の増加を図り、明るさを低下することなく10%の省電力を実現している。

また、有限要素法による応力解析手法を用いてランプのレンズや反射鏡の形状、厚さの最適化設計を行ない、従来品と同じ形状で約16% (50g) の軽量化を実現している。

《主な特性》

形・素子名		ガラス球	全長 (mm)	口金	消費電力 (W)	最大光度 (cd)	1/2 ビーム 開き (度)	ビーム光束 (lm)	平均寿命 (時間)
集光形	75 W形 CRS 100 V 68 WL	PAR121	132	E26	68	4,500	15	190	2,000
	100 W形 CRS 100 V 90 WL	〃	〃	〃	90	6,500	〃	260	〃
	150 W形 CRS 100 V135 WL	〃	〃	〃	135	10,000	〃	400	〃
	75 W形 CRS 110 V 68 WL	〃	〃	〃	68	4,500	〃	190	〃
	100 W形 CRS 110 V 90 WL	〃	〃	〃	90	6,500	〃	260	〃
	150 W形 CRS 110 V135 WL	〃	〃	〃	135	10,000	〃	400	〃
分散形	75 W形 CRF 100 V 68 WL	〃	〃	〃	68	1,800	30	280	〃
	100 W形 CRF 100 V 90 WL	〃	〃	〃	90	2,600	〃	380	〃
	150 W形 CRF 100 V135 WL	〃	〃	〃	135	3,800	〃	580	〃
	75 W形 CRF 110 V 68 WL	〃	〃	〃	68	1,800	〃	280	〃
	100 W形 CRF 110 V 90 WL	〃	〃	〃	90	2,600	〃	380	〃
	150 W形 CRF 110 V135 WL	〃	〃	〃	135	3,800	〃	580	〃

(資料提供・問い合わせ先 東京芝浦電気㈱照明市販営業部 〒101 東京都千代田区神田駿河台1-6 電話 (03) 233-2392)

《特長》

- (1) 従来のランプと同じビーム光束 (明るさ) で、10%の省電力形である。
- (2) 従来のランプに比べ、約50g軽い。
- (3) 熱線が従来比約10%少ない。
- (4) 従来の器具にそのまま使用できる。
- (5) 従来の一般形「クールビーム®」と同じ価格である。

《主な用途》

軽量化により、ランプ取付け器具への負担の軽減、従来以上の多灯照明設計、光の照射方向のきめ細かい制御などが可能となるとともに、従来のランプと同じビーム光束で10%の節電、さらに10%熱線が少ないことなどの特長を生かし、ショーウィンドーのスポット照明、ダウンライト照明をはじめとして、店舗、ホテル、デパート、スーパーマーケット、遊技場などに広く使用できる。