反射像が重畳する透明材料を透して見る視対象の輝度予測と それに用いる透明材料の光学特性

THE PREDICTION OF THE LUMINANCE OF A VISUAL TASK SEEN THROUGH A TRANSPARENT MATERIAL WITH A VEILING REFLECTION AND THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE TRANSPARENT MATERIALS

金 祐根*, 佐藤隆二**, 檜崎正也***

Wookun KIM, Ryuji SATOH and Masaya NARASAKI

The prediction of the luminance of a task and the background seen through a transparent material covered with a veiling reflection is formulated.

According to this formulation, the regular reflectance and the regular transmittance of typical transparent materials (four kinds of glasses and five kinds of synthetic resins) which are defined with luminance are measured, and their angular characteristics are presented.

These measured values are compared with the theoretical values obtained with Fresnel's formulae and Lambert-Bouguer's law, and the possibility and limit of such theoretical predictions of regular reflectance and regular transmittance of transparent materials are discussed.

Keywords : veiling reflection, regular reflectance, regular transmittance

反射像, 正反射率, 正透過率

1. はじめに

美術館や博物館などにおいて、ガラス越しに展示物を鑑賞する場合や、事務作業でビニールフィルムに収められた書類などを見る場合、ガラスやビニールフィルムの表面に窓や照明器具などの高輝度面の反射像が生じて、視対象である展示物や書類が見えにくくなる現象をしばしば経験する。

これらの現象は、透明材料の表面に生じる反射像が光幕となり、視対象の持つ輝度対比の低下を引き起こすために生じるもので「光幕反射」として広く知られている。

この光幕反射が見え方に及ぼす影響を評価するには、反射像が重畳した視対象の輝度や輝度対比などの刺激とそれに対する反応（評価）との関係を把握する必要がある。鑑賞作業においては、ガラスの透過率と反射率などを仮定したうえで、鑑賞者の反射像の輝度が展示物の輝度の約1/20以下であれば障害はない¹⁾とされているものの、その根拠は不明確であり、広範な条件に適用でき

る評価法はまだ確立されていない。また、反応を決定する刺激は、視対象の輝度や輝度対比、透明材料の光学的特性および反射像となる面の輝度などの要因に支配されるものであるが、その算定法も確立されているとは言い難い現状である。中でも、透過あるいは反射の方向に依存する透明材料の光学特性の取り扱いがあいまいで統一されておらず、また、実用に供するための資料が不足している点にも算定上の問題点が残されていると考えられる。

そこで、本報では、反射像が重畳した透明材料を透して見る視対象の輝度および輝度対比の算定に用いる透明材料の諸光学的特性を透過あるいは反射の方向に依存するものとして規定し、それを活用する輝度算定法の定式化を試みる。また、各種の透明材料を対象として、ここで規定した光学特性の測定結果を示すとともにフレネルの理論などに基づいた理論値との比較を行う。

なお、近年事務室に導入されるようになった VDT

本稿の一部は昭和63年度日本建築学会近畿支部研究報告集に発表している。

* 大阪大学工学部建築工学科 大学院生・工修

** 大阪大学工学部建築工学科 助教授・工博

*** 大阪大学工学部建築工学科 教授・工博

Graduate student, Dept. of Architectural Eng., Faculty of Engineering Univ. of Osaka, M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Engineering Univ. of Osaka, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Engineering Univ. of Osaka, Dr. Eng.

(Visual Display Terminals) も光幕反射の影響を受けやすい視対象であり、それを防止したり低減したりするための種々の検討が試みられている^{2), 3), 4), 5), 6)}。

しかし、そこでは、文字の表示面と反射像を生じるガラス面を一体のものと考えて、その光学特性を規定している点で、本報での輝度算定と基本的な立場が異なるものであると言える。また、そこでは、反射像の輝度が方向に依存することを考慮していない点にも不満が残るのである。

2. 反射像が重畳した透明材料を透して見る視対象の輝度および輝度対比

図—1 に示すように透明材料Gを透して視対象Tを見る際、高輝度面Sの透明材料上に生じた反射像Vが視対象に重畳する場合を考える。このときの視対象の見かけの輝度 (Apparent Luminance) AL_t は、透明材料を透過した視対象の輝度 L_t に反射像の輝度 L_v が重畳したものであり、次式で与えられる。

$$AL_t = L_t + L_v \dots\dots\dots (1)$$

ここで、視点、透明材料、視対象および高輝度面の位置関係が同一であれば、透明材料を透して見る視対象の輝度 L_t は視対象の輝度 L_i に、また、反射像の輝度 L_v は高輝度面の輝度 L_s に比例する。したがって、透明材料の持つそれぞれの比例定数を τ および γ とすると二つの輝度は以下のように表される。

$$L_t = \tau \cdot L_i \dots\dots\dots (2)$$

$$L_v = \gamma \cdot L_s \dots\dots\dots (3)$$

これらの比例定数である τ と γ は、それぞれ、一般に正透過率および正反射率 (あるいは鏡面反射率) と呼ばれているものに相当するが、それらとは微妙に異なる透明材料の光学特性を与える量である。すなわち、一般に用いられている正透過率と正反射率は、JIS Z 8120 で定義されているように、入射光束に対する透過光束あ

るいは反射光束の比で規定されたもの⁷⁾であるのに対して (2), (3) 式における τ と γ は、いずれも輝度の比率として規定されたものである。

したがって、前者は「光束正透過率」および「光束正反射率」、後者は「輝度正透過率」および「輝度正反射率」とでも呼ぶべきものである。

しかし、両者の概念は同じものであるので、以下では単に「正透過率」および「正反射率」と称することにする。

ここでの検討対象が輝度であり、視対象や高輝度面の条件も輝度で規定されるという実状を考えれば、透明材料の光学特性も輝度に関する量で規定することが妥当であると考えられる。なお、これらの正透過率と正反射率は後述するように、いずれも透明材料の法線に対して視線がなす角 i (図—1 参照) に依存する量であるので、(2), (3) 式での輝度算定には透明材料と視線との位置関係で定まる i に応じた値を用いる必要がある。

このように、透明材料の二つの光学特性 τ, γ が与えられれば、視対象の見かけの輝度 AL_t は、次式で算定できる。

$$AL_t = \tau L_t + \gamma L_s \dots\dots\dots (4)$$

また、視対象に隣接する背景の輝度が L_b であるとき、それに対する視方向が視対象に対するものと同一であるとすると、反射像が重畳した透明材料を透して見る背景の見かけの輝度 AL_b は、次式で与えられる。

$$AL_b = \tau L_b + \gamma L_s \dots\dots\dots (5)$$

したがって、反射像が重畳した視対象と背景の見かけの輝度対比 (Apparent Contrast) AC は、次式で与えられる。

$$AC = \frac{AL_b - AL_t}{AL_b} = \frac{\tau(L_b - L_t)}{\tau L_b + \gamma L_s} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、視対象そのものの輝度対比 C は、

$C = (L_b - L_t)/L_b$ であるので、これを用いて見かけの輝度対比を表現すると、次式のようになる。

$$AC = C \cdot \frac{\tau L_b}{\tau L_b + \gamma L_s} = C \cdot \frac{1}{1 + \frac{\gamma L_s}{\tau L_b}} \dots\dots\dots (7)$$

これより、反射像が重畳することによる視対象の輝度対比の減少の程度は、反射像の輝度 γL_s と透明材料を透過した背景の輝度 τL_b との比で決まり、その比が大きいほど、すなわち、正反射率 γ あるいは高輝度面の輝度 L_s が大きいほど、また、正透過率 τ あるいは背景輝度 L_b が小さいほど輝度対比の減少が大きいことが分かる。

したがって、反射像が重畳した視対象の見かけの輝度対比 AC が低いほど反射像による見え方の阻害が大きいと考えられ、透明材料を透して見る視対象の見え方は、これらの正反射率 γ あるいは高輝度面の輝度 L_s 、また、

図—1 輝度算定の手法

正透過率 τ あるいは背景輝度 L_0 の4つの要因によって左右されるものとして処理する必要がある。

3. 各種透明材料の正透過率と正反射率

上述したように反射像が重畳した透明材料を透して見る視対象の輝度や輝度対比を求めるには、透明材料の正透過率および正反射率を知る必要がある。また、これらの特性値は、透過あるいは反射の方向に依存するものであるとの認識の下に、ここでは、展示空間や事務空間で実用に供されている透明材料を数種選定して、それらの特性値の角度特性についての測定結果を示すとともにそれに対する若干の考察を加える。

3.1 測定の概要

(2) 式および(3)式で規定される正透過率および正反射率は、透明材料が存在しない場合の対象物の輝度に対する透明材料が介在した場合の同一対象物の輝度であるので、それらの輝度を測定するために図-2に示す装置を作成し、それを暗室内に設置した。輝度の測定対象物は、20W白色蛍光ランプ6本を内蔵した33×66×17 (cm) の箱の前面に乳白アクリル板を貼り、さらにその表面の周辺部を黒色ケント紙で覆った直径5 cm の円形の拡散面(以下光源面と呼ぶ)である。

まず、上記の光源面の法線方向の輝度を2.9 m離れた位置に設置した輝度計(TOPCON 製 BM-7 型)を用いて視角0.2度で測定し、それを正透過率および正反射率の測定の基準輝度 L_0 とした。

次に、図-2 (a) に示すように光源から1.4 mの位置に所定の入射角 i となるように透明材料(以下試料と呼ぶ)を設置してそれを透して光源面の輝度 L_τ を測定し、次式で正透過率 τ を算定した。

$$\tau = L_\tau / L_0 \quad \cdots \cdots (8)$$

また、図-2 (b) に示すように試料に対する光源面

の所定の入射角 i と等しい反射角が得られる位置に輝度計を設置して試料によって生じる反射像の輝度 L_v を測定し、次式で正反射率 γ を算定した。

$$\gamma = L_v / L_0 \quad \cdots \cdots (9)$$

なお、この L_0 の測定に際しては試料背後の壁などからの透過光の影響を防ぐため、図示のような黒色塗装した反射防止板を5枚設けた暗箱を試料の背後に設置した。

正透過率および正反射率の角度特性を把握するために設定した入射角の条件は、表-1に示すとおり10度きざみの角度とした。

測定値の信頼度を高めるため、試料などの角度設定を改めて、それぞれ3回ずつの測定を繰り返した。

また、測定対象試料は、表-2に示す透明なガラス4種類と合成樹脂5種類であり、いずれの試料も展示空間や事務空間などで使用されているものである。

なお、光源と輝度計の位置関係により入射角0度の反射輝度の測定が、また、合成樹脂類のうち薄くて自立できないものについては、測定に際して木枠を取り付けたため、その影響で入射角80度の透過輝度の測定が不可能であった。

3.2 測定結果と考察

各3回の測定結果から求めた同一条件についての正反射率と正透過率には、入射角が60度を超える場合において数%の差異が生じたが、入射角が小さい場合にはほとんど差が認められなかった。この差異は、角度設定の微妙な違いによるものと判断して、3回の測定結果の平均値を各種透明材料の特性値とすることにした。

(a) 正反射率

4種のガラスについて得られた入射角ごとの正反射率を示したものが表-3 (a) であり、それを入射角との関係として図示したものが図-3 (a) である。これより、

(a) 正透過率の測定

(b) 正反射率の測定

図-2 実験装置

表-1 透明材料に対する光源の入射角

	正 反 射 率	正 透 過 率
入 射 角	10, 20, 30, 40 50, 60, 70, 80	0, 10, 20, 30 40, 50, 60, 70

表-2 測定対象試料

試 料	厚さ(mm)	特 徴
普 通 ガ ラ ス	10	一般のフロートガラス
高透過ガラス	10	可視光線の透過率が高い
低反射ガラス	3	多層薄膜をコーティング
紫外線防止ガラス	10	フィルムをはさんだ合わせガラス
ア ク リ ル	5	無色透明・光の透光性が高い
硬質ビニール	0.5	一般事務のケース用ビニール
塩ビフィルムA	0.1	事務書類保存用ビニールフィルム
塩ビフィルムB	0.1	事務書類保存用ビニールフィルム
塩化ビ・シート	1	無色透明・柔軟性が高い

いずれのガラスも入射角 40 度まではほぼ一定の値で、入射角がそれよりも大きくなるとともに正反射率が急増することが分かる。しかし、低反射ガラスの正反射率は、他の 3 者と比べて値が小さく、特に、入射角が 50 度以下では、他の 3 者の 1/10~1/5 の値となっている。このことは、低反射ガラスにおける表面処理の効果が顕著であることを示している。

表—3 (b) は、5 種類の合成樹脂についての測定値を示したものであり、それを図示したものが図—3 (b) である。

これより、入射角による正反射率の変化の傾向は、ガラスの場合と同様であることが分かる。また、2 種類の塩ビフィルムを除く他の 3 者は、入射角が大きい場合に若干の差異は認められるものの、普通ガラスなどとはほぼ等しい値を示すが、2 種の塩ビフィルムは他の試料より

図—3 入射角と正反射率の関係

表—3 入射角と正反射率

(a) ガラス

試料 角 度	普 通 ガ ラ ス	高 透 過 ガ ラ ス	低 反 射 ガ ラ ス	紫 外 線 防 止 ガ ラ ス
0	0.077	0.085	0.008	0.076
10	0.077	0.085	0.008	0.076
20	0.078	0.087	0.008	0.078
30	0.085	0.093	0.012	0.084
40	0.101	0.111	0.026	0.100
50	0.146	0.157	0.072	0.144
60	0.264	0.280	0.206	0.258
70	0.495	0.517	0.490	0.482
80				

(b) 合成樹脂

試料 角 度	アクリル	硬 質 ビ ニール	塩ビフィ ルム A	塩ビフィ ルム B	塩 化 ビ ・シート
0	0.073	0.075	0.037	0.043	0.069
10	0.073	0.077	0.037	0.044	0.069
20	0.074	0.079	0.041	0.046	0.070
30	0.081	0.085	0.046	0.052	0.076
40	0.100	0.100	0.061	0.065	0.094
50	0.146	0.144	0.094	0.096	0.134
60	0.266	0.257	0.187	0.180	0.240
70	0.534	0.044	0.379	0.344	0.407
80					

4~8 % 低い値を示しており、材質による差異が存在することが分かる。

(b) 正透過率

4 種のガラスについて得られた入射角ごとの正透過率を示したものが表—4 (a) であり、それを図示したものが図—4 (a) である。これより、ガラスの正透過率は入射角の増大に伴い、特に 50 度を超えると著しく減少し、正反射率の場合と逆の傾向を示すことが分かる。

しかし、試料による差異が明確に存在し、普通ガラスと比較して入射角 70 度以下の範囲で一様に低反射ガラスが 12 % 程度、また、高透過ガラスが 5 % 程度大きい値を示している。

表—4 (b) は、5 種類の合成樹脂についての測定値を示したものであり、それを図示したものが図—4 (b) である。

これより、入射角が大きくなるほど正透過率が減少する傾向はすべての試料に共通で、ガラスと同様であることが分かる。また、ガラスと同様に、試料による差異が存在するが、その差異はガラスの場合と異なり、入射角によって大きく異なっていることが分かる。このことは、透明材料を透しての視対象の輝度を正確に把握するには、ここで示したような光学的特性を材料ごとに得ておく必要があることを示唆していると言えよう。

(c) 理論値との比較検討

ガラスのような平行平板では、そこに入射した光は

表—4 入射角と正透過率

(a) ガラス

試料 角 度	普 通 ガ ラ ス	高 透 過 ガ ラ ス	低 反 射 ガ ラ ス	紫 外 線 防 止 ガ ラ ス
0	0.859	0.904	0.976	0.846
10	0.859	0.904	0.975	0.844
20	0.857	0.904	0.968	0.842
30	0.855	0.904	0.967	0.839
40	0.847	0.896	0.963	0.831
50	0.827	0.877	0.948	0.811
60	0.777	0.832	0.902	0.758
70	0.657	0.708	0.772	0.632
80	0.368	0.395	0.459	0.340

(b) 合成樹脂

試料 角 度	アクリル	硬 質 ビ ニール	塩ビフィ ルム A	塩ビフィ ルム B	塩 化 ビ ・シート
0	0.927	0.852	0.845	0.819	0.852
10	0.926	0.849	0.842	0.815	0.850
20	0.925	0.849	0.836	0.809	0.845
30	0.922	0.846	0.821	0.795	0.839
40	0.918	0.831	0.797	0.769	0.829
50	0.897	0.807	0.755	0.715	0.802
60	0.841	0.753	0.669	0.611	0.740
70	0.701	0.627	0.489	0.403	0.563
80	0.373	0.302	—	—	—

図一5 (a) に示すようにその境界面で反射・屈折が何度も繰り返されており、測定時に部厚い透明材料に生じる反射像を詳細に観察すると、それは図一5 (b) に示すように材料の表面と裏面における二つの反射像で構成されていることが分かった。

目視によると三次以上の反射像は顕著でなかったもので、ここで輝度を測定した反射像は、ガラスの表面（一次反射）と裏面（二次反射）による二つの像が重畳したものであると考えてその理論値との比較を試みた。

入射角と反射角が等しい場合の一次反射の反射率 γ_1 は、材料の屈折率が n である場合、フレネル (Fresnel) の理論式⁸⁾⁹⁾により、次式で与えられる。

(a) ガラス (b) 合成樹脂

図一4 入射角と正透過率の関係

(a) 透明材料の反射・透過・屈折

(b) 透明材料に生じる反射像の模様

図一5 透明材料における反射および透過

$$\gamma_1 = (n-1)^2 / (n+1)^2 \dots\dots\dots (10)$$

また、二次反射の反射率 γ_2 は、透過距離が x であるときの透過率を $\tau(x)$ とすると、次式で与えられる。

$$\gamma_2 = \gamma_1^2 (1 - \gamma_1)^2 \tau^2(x) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、透過率 $\tau(x)$ は、材質によって決まる吸収係数が α であるとき、ランベルト・ブーゲ (Lambert-Bouguer) の法則により、 $\tau(x) = e^{-\alpha x}$ で与えられる⁸⁾⁹⁾。

したがって、両者が重畳した部分の総合反射率 γ は、次式で表される。

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 = \gamma_1 \{1 + \tau^2(x)(1 - \gamma_1)^2\} \dots\dots\dots (12)$$

普通ガラスの屈折率 n は、1.52 であり、吸収係数 α は 8.01×10^{-3} であるので、厚さ 10 mm の普通ガラスについて上記の式で一次、二次および総合反射率を種々の入射角について算定し、その結果を示したものが表一5 である。

また、表には、三つの成分に対応する図一5 (b) に示す3つの部位（表面のみ、裏面のみ、重畳部分）の輝度を別々に測定することが可能であった入射角 30 度から 70 度の範囲における普通ガラスの正反射率を併記してある。

これらを比較すると三者とも測定値と理論値がほぼ一致していることが分かる。

ここでは、材質の特定が困難で屈折率など材料の特性値が不明であった合成樹脂類やその取り扱いが不明である被膜処理が施されている低反射ガラスについては、検討することができなかったが、透明材料の正反射率は材料特性さえ分かれば、理論的に表一5 の結果は予測できると考えてよいことを示唆している。

また、日常経験する反射像の大半は、表面と裏面での像が重畳したものであるので実務上はそれらを総合した正反射率を用いればよいと考えられる。

一方、図一5 (a) に示すように透過も反射の場合と同様に透明材料を直接透過する透過像（一次透過）および内部反射による透過像（二次以上の透過）が重畳していると考えられ、一次および二次の透過率 τ_1 と τ_2 は、次式で与えられる。

$$\tau_1 = \tau(x)(1 - \gamma_1)^2 \dots\dots\dots (13)$$

$$\tau_2 = \gamma_1^2 (1 - \gamma_1)^2 \tau^3(x) \dots\dots\dots (14)$$

表一5 普通ガラスの理論値と測定値の比較

角 度	反 射 像						透 過 像	
	理 論 値			測 定 値			理論値	測定値
	一 次	二 次	総 合	一 次	二 次	総 合	一 次	総 合
0	0.043	0.034	0.077	—	—	—	0.845	0.859
10	0.043	0.034	0.077	—	—	—	0.845	0.859
20	0.043	0.034	0.077	—	—	—	0.844	0.857
30	0.044	0.034	0.078	0.042	0.039	0.082	0.840	0.855
40	0.048	0.036	0.084	0.052	0.037	0.087	0.830	0.847
50	0.060	0.044	0.104	0.061	0.044	0.103	0.805	0.827
60	0.092	0.062	0.154	0.088	0.058	0.148	0.748	0.777
70	0.175	0.097	0.272	0.146	0.114	0.268	0.615	0.657
80	0.390	0.118	0.508	—	—	—	0.335	0.368
90	1.000	0.000	1.000	—	—	—	0.000	—

しかし、 $\tau_2/\tau_1 = \gamma_1^2 \tau^2(x)$ で与えられる一次に対する二次の透過率の比率は、ガラスの場合非常に小さな値となるので、二次以上の透過を無視して一次の透過率 τ_1 によって透過像の輝度が決まると考えてよい。

このことは、表—5 に示す (13) 式で求めた普通ガラスの一次透過率の理論値が測定値とほぼ一致していることから裏付けられる。

4. おわりに

本報では、反射像が重畳した透明材料を透して視対象を見る場合、視対象の輝度算定に必要な反射像の輝度、視対象およびその背景の輝度を算定する方法の定式化を試みた。

また、それらの輝度算定の際に必要な透明材料の正反射率および正透過率の角度特性を把握し、これらの結果とフレネルの理論などに基づいた理論値との比較を行い、正反射率および正透過率の理論に基づく誘導の可能性を示唆した。

しかし、本報で扱った身近にある透明材料の多くは、その物性値を特定することが困難なものであるので、正確な輝度を把握する場合には、実測によってそれらの正反射率および正透過率を明示する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：昼光照明の計画，日本建築学会設計計画パンフレット 30，pp. 25～26，彰国社，1985. 12
- 2) 窪田 悟：Visual Display Terminal 用フィルタの比較検討，照明学会誌，第 70 巻 第 10 号，pp. 22～26，1986. 10
- 3) 田淵義彦ほか 2 名：CRT ディスプレイの表示文字と外部反射映像の見え方の主観評価，照明学会誌，第 71 巻 第 2 号，pp. 3～9，1987. 2
- 4) 金谷末子ほか 2 名：VDT 作業環境における照明器具の輝度許容限界値の検討，照明学会誌，第 71 巻 第 6 号，pp. 37～38，1987. 6
- 5) 窪田 悟，高橋 誠：CRT ディスプレイ上の光源の反射像の許容輝度，照明学会誌，第 73 巻 第 6 号，pp. 36～40，1989. 6
- 6) 田淵義彦ほか 2 名：CRT ディスプレイ表示面に映る外部反射光源の輝度パターンが光源の許容輝度に及ぼす影響，照明学会誌，第 74 巻 第 2 号，pp. 38～44，1990. 2
- 7) 日本規格協会編：JIS z 8120 光学用語，1986. 2
- 8) 建築設備大系編集委員会編：建築設備原論 (I)，建築設備大系 1，彰国社，pp. 298～303，1965. 12
- 9) 齊藤辰弥著：照明工学講義，電気書院，pp. 213～216，1966. 5

(1991 年 1 月 10 日原稿受理，1991 年 5 月 1 日採用決定)