

## 画像処理技術を利用した反射・透過映像の高速生成

尊田嘉之<sup>+</sup> 樋口作夫<sup>++</sup> 三箇山正樹<sup>+</sup> 大柿聡<sup>+++</sup>

<sup>+</sup>旭硝子中央研究所 <sup>++</sup>旭硝子硝子建材事業本部

<sup>+++</sup>旭硝子アメニテック

横浜市神奈川区羽沢町1150

建築用ガラスの多くが平面ガラスであり、また建築空間のスケールとガラスの厚さからして屈折効果が無視できることから、本稿ではレイトレーシングとは異なる反射・透過映像の生成手法を示す。本手法は反射映像と透過映像との画像合成を基本とし、レイトレーシングのような交点探索を一切行わない。したがって反射・透過映像を高速に生成することができる。この点は多数の映像を必要とするアニメーション作成や高解像度の映像生成に有利である。また現実に近い出力を実現するためには、ガラス反射率・透過率の入射角特性と分光特性を、映像生成プロセスに取り入れる必要があるが、このための具体的な処理方法についても述べる。

和文キーワード 反射・透過映像 入射角特性 分光特性 画像処理 アニメーション

## A Fast Reflection & Transmission Image Generation using Image Processing

Yoshiyuki Sonda<sup>+</sup> Sakuo Higuchi<sup>++</sup> Masaki Mikayama<sup>+</sup> Satoshi Ohgaki<sup>+++</sup>

<sup>+</sup>Research Center Asahi Glass

<sup>++</sup>Flat Glass & Construction Materials General Div. Asahi Glass

<sup>+++</sup>Asahi Glass Amenitec

Hazawa -cho 1150, Kanagawa-Ku, Yokohama-shi

### Abstract

We constructed a fast rendering system to generate architectural glass image. This method is based on the fact that architectural glass almost has plane shape. The basic concept of this method is to superpose the reflection image on the transmission image, therefore the final image can be created without high cost ray tracing. We can create CG animation with accurate reflection and transmission image by this system. Still more it will be mentioned how to consider the optical characteristic of each kind of glass for high accuracy rendering.

英文 key words Reflection & Transmission Image, Incident Angle Characteristic, Spectral Characteristic, Image Processing, Animation

## 1 はじめに

建築用ガラスの多くが平面であること、屈折の影響が建築空間のスケールとガラスの厚さからして無視し得ることを考慮して、レイトレーシングとは異なる反射・透過映像の生成手法を示す。本手法は曲面ガラスのレンダリングや屈折効果の予測には不向きであるが、建築用ガラスの意匠性を決定するガラスの光学性能（分光光学性能、入射角特性）を映像生成プロセスに取り込み、あくまでも現実に近い映像を出力することを目的とする。

レイトレーシングは、高画質な映像生成に有用である反面、内部処理において多くの交点探索が要求されるので、計算時間がかかるという欠点を持ち合わせている。同手法の高速化に関する試みは盛んであるが、アニメーション作成、高解像度の映像生成、試行錯誤的な設計作業にレイトレーシングを利用するには、依然として大きな負担があるものと思われる。他方、本手法は交点探索を一切行わないので、反射・透過映像を高速に生成することができる。したがって視点が変わる度に映り込みの様子が変化するアニメーションであっても、効率良く作成することが可能である。

## 2 反射・透過映像の生成原理

図-1において、ガラス面の反射性状、透過性状を各々正反射、正透過とする。ガラス面上の点Pを視点 $P_v$ より見たときの輝度 $L_p$  [cd/m<sup>2</sup>]は、

$$L_p = r_p \cdot L_a + t_p \cdot L_b \quad (1)$$

と与えられる。ここに、 $r_p$ はPにおける正反射率、 $t_p$ はPにおける正透過率である。 $L_a$ はPより見た物体A上の点 $P_a$ の輝度 [cd/m<sup>2</sup>]であり、 $P_a$ は、

$$\angle P_a P P_n = \angle P_v P P_n \quad (2)$$

を満たす位置にある。 $P_n$ はPより延ばしたガラス面の法線上にあるとする。また $L_b$ はPより見た物体B上の点 $P_b$ の輝度 [cd/m<sup>2</sup>]であり、屈折の影響を無視すれば、 $P_b$ は、

$$\angle P_b P P_n + \angle P_v P P_n = \pi \quad (3)$$

を満たす位置にある。ガラス面上の全ての点において同様に輝度を求めることができれば、反

射・透過映像が得られることになる。

CG画像は輝度分布に対応するものであるから、以上の計算を画像合成で行うことを考える。すなわち、式(1)の第一項から得られる画像（反射映像）と、第二項から得られる画像（透過映像）を各々独立に生成し、最後に重ね合わせるわけである。問題は、反射映像や透過映像をいかにして生成するかにある。

レイトレーシングでは、 $P_a$ や $P_b$ を交点探索により求めることになる。この方法は処理時間さえ気にしなければ、ガラス面の形状に制限なく適用できる上、屈折効果も捉えることができる。しかし、ガラス面を平面に限定でき、かつ屈折効果も無視できるならば、交点探索の必要性がなくなる。なぜならば、物体Aの反射像は、ガラス面に対する面对称変換により決まり、同様に物体Bの透過像も形状的变化（ゆがみ）を受けることがないからである。交点探索さえ無ければ、描画時間の短縮を期待できるから、多数の反射・透過映像の生成を要求されるアニメーション作成に非常に有利である。

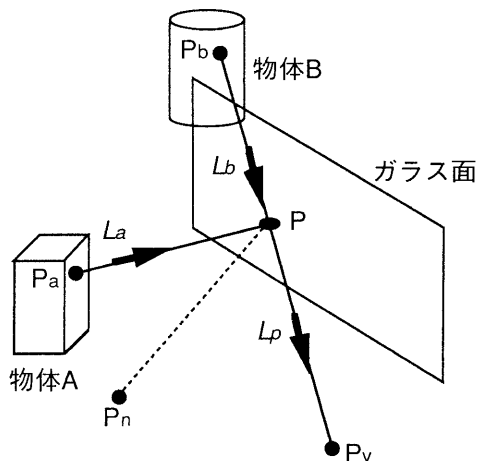


図-1 反射・透過映像の生成原理

## 3 反射映像の生成

図-2に示すように、平面ガラスに映る虚像と実像とは、ガラス面を境に面对称の関係にある。この関係は視点が変わしても保たれる。し

たがって、アニメーションの前処理として虚像を求めておき、視点が変わる度に虚像を表示すれば、それは反射映像となる。

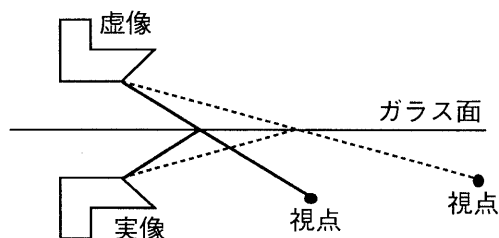


図-2 実像と虚像の位置関係

三次元における面対称変換は、一般に以下の変換式により行える。

$$X' = X - 2 \cdot a \cdot \text{dist} \quad (4)$$

$$Y' = Y - 2 \cdot b \cdot \text{dist} \quad (5)$$

$$Z' = Z - 2 \cdot c \cdot \text{dist} \quad (6)$$

ここに、 $X, Y, Z$ は実像の座標値、 $X', Y', Z'$ は虚像の座標値、 $a, b, c$ はガラス面を含む平面の法線ベクトルのxyz成分、である。また $\text{dist}$ は実像上の点(座標値 $X, Y, Z$ )とガラス面との距離であり、

$$\text{dist} = a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z + d \quad (7)$$

と与えられる。ただし、 $d$ はガラス面と原点との距離である。

なお虚像を作成するに当たっては、ガラス面の表半空間にある物体だけに面対称変換を行うこととなる。ガラス面の裏側にある物体は決して反射映像にはなり得ないからである。また虚像についても隠れ面消去の必要性があり、これをZバッファアルゴリズムで処理する。

続いて映り込みの強さを考える。虚像の輝度は式(1)の第一項にあるように、実像が有する輝度と、ガラス面の反射率によって決まる。これを画像で考えるならば、面対称変換を施しただけの画像の階調値に正反射率を乗じることになる。すなわち、虚像の階調値 $g_r(x, y)$ は、

$$g_r(x, y) = f_r(x, y) \cdot r(x, y) \quad (8)$$

と与えられる。ただし、 $x, y$ は画素位置を示す変数、 $f_r(x, y)$ は面対称変換を施しただけの画像の画素 $(x, y)$ における階調値、 $r(x, y)$ は画素 $(x, y)$ に対応するガラス面の正反射率、である。

## 4 透過映像の生成

図-3に示すように、屈折効果は無視できるならば、ガラスが無い状態で見た物体の像と透過像とは形状的に差がない。

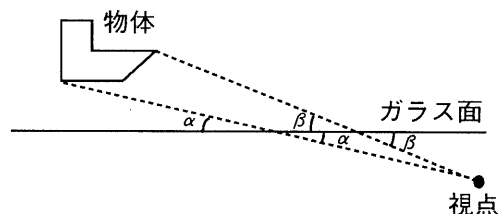


図-3 屈折効果を考慮しないときの透過像

透過の場合も反射と同様に、透過像の強さを考える必要がある。式(1)の第二項から明らかにように透過像の輝度は、物体の輝度とガラス面の透過率で決まる。このことを画像で考えるならば、ガラス面が一切ないものとして表示した物体の画像の階調値に正透過率を乗じることになる。すなわち、虚像の階調値 $g_t(x, y)$ は、

$$g_t(x, y) = f_t(x, y) \cdot t(x, y) \quad (9)$$

と与えられる。ただし、 $f_t(x, y)$ はガラス面が無い状態で表示した画像の画素 $(x, y)$ における階調値、 $t(x, y)$ は画素 $(x, y)$ に対応するガラス面の正透過率、である。

## 5 マスク処理の必要性

### 5.1 二値画像によるマスク処理

反射・透過映像は、式(8)で得られる画像と、式(9)で得られる画像とを加算することで得られる。すなわち、反射・透過映像の階調値 $g(x, y)$ は、

$$g(x, y) = g_r(x, y) + g_t(x, y) \quad (10)$$

と与えられる。これが反射・透過映像生成の基本式となる。

ところで図-3に示すように、

- (1) 画像全体がガラス面となるとは限らない、
- (2) ガラス面と視点の間に障害物が存在する、ことが通常である。したがって画像においてガラス面が占める画素を求めることは勿論、隠れ面消去によってガラス面のどの部分が可視であるかを明かにする必要がある。

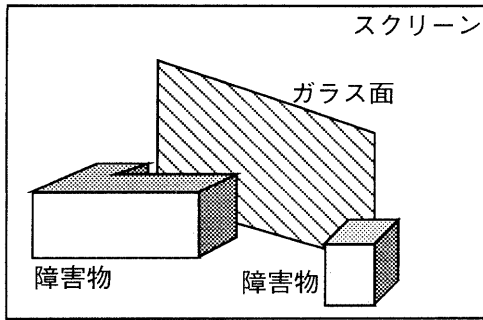


図-3 マスク画像の必要性

上記の問題点を解決するために、ここではマスク画像を用いて、ガラス面の位置、可視性を記述することにする。その方法として、ガラス面を白（フルカラー画像の場合、16進数表示でFFFFFF）、障害物を含むその他の物体を黒でレンダリングすることを考える。得られる画像は二値画像となる。このときZバッファアルゴリズムにより、隠れ面消去を行うことで、ガラス面の可視部を明かにすることができる。

マスク画像において白く塗られた画素のみに、式(10)を適用することで、反射・透過映像を生成することができる。この処理のアルゴリズムを、C言語風を書くならば、以下のようになる。

```

/* Start */
反射像の作成;
透過像の作成;
マスク画像（二値画像）の作成;
すべての画素(x,y)について、
if(m[x][y] != 0){
    g[x][y] = fr[x][y]*f[x][y]
        + ft[x][y]*t[x][y];
}
/* End */

```

ただし、 $m[x][y]$ はマスク画像の階調値、 $g[x][y]$ は反射・透過映像の階調値、 $fr[x][y]$ は面对称変換を施しただけの画像の階調値、 $ft[x][y]$ はガラス面が無い状態で表示した画像の階調値、 $f[x][y]$ は正反射率、 $t[x][y]$ は正透過率である。

### 5.2 マスク画像への物性情報の付加

スクリーン内に種類の異なるガラスがある場合、二値のマスク画像ではその区別をつけることはできない。そこでマスク画像にガラスの物

性情報を付加することを考える。いまガラスの品種別に番号付け（1～n）が、なされているものとする。以下この番号を登録番号と称する。後に取り扱う反射率や透過率の入射角特性、分光特性も登録番号を介して参照できるように、テーブル化しておく。この概念を図-4に示す。

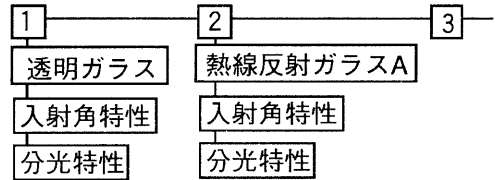


図-4 ガラス物性値の登録

5.1ではガラス面を白（FFFFFF）でレンダリングしたが、ここでは下位8ビットを利用して登録番号そのもの（000001~0000FF）でレンダリングする。この場合の反射・透過映像の生成アルゴリズムをC言語風を書くならば、以下のようになる。

```

/* Start */
反射像の作成;
透過像の作成;
マスク画像（二値画像）の作成;
すべての画素(x,y)について、
    if(m[x][y] != 0){
        id = m[x][y];
        g[x][y] = fr[x][y]*f[id][x][y]
            + ft[x][y]*t[id][x][y];
    }
/* End */

```

ただし、 $id$ はガラスの登録番号、 $f[id][x][y]$ は正反射率、 $t[id][x][y]$ は正透過率である。

## 6 入射角特性の考慮

図-5に示すように、ガラスの反射率や透過率は光線の入射角によって変化する。特に入射角が $60^\circ$ を越えると反射率、透過率が共に著しく変化する様子がわかる。この性質を入射角特性と呼ぶ。ガラスを正面から見た場合と斜め前方から見た場合とで、映り込みや透け方の程度が異なるのは、入射角特性によるものである。

精度良く反射・透過映像を生成するためには、入射角特性を考慮しなければならない。

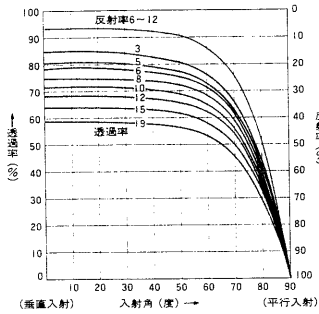


図-5 ガラス反射率・透過率の入射角特性

入射角特性を考えることは、式(8)において反射率 $r(x, y)$ を、式(9)において $t(x, y)$ に対応する入射角に応じて変化させることである。しかし画素 $(x, y)$ ごとに入射角を算出していたのでは、画像生成時間を増大させるだけである。そこで本稿では、以下に示す方法により高速化を図る。

- 1) ガラス面を図-6に示すようなメッシュに分割し、 $\cos\theta$  (ただし $\theta$ は入射角)をメッシュ節点でサンプリングすることを考える。

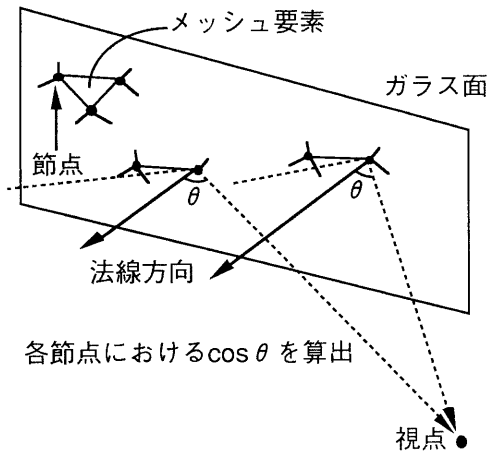


図-6 メッシュによる $\cos\theta$ のサンプリング

- 2) 視点位置よりメッシュ節点における $\cos\theta$ を算出し、その値を0~FFの間で線型補間しデジタル化する。
- 3) 上述のデジタル値を基にグローシェーディングでメッシュをレンダリングして、これをマスク画像とする。

- 4) この際5.2で説明したガラスの登録番号と $\cos\theta$ の情報がちか合わないよう、登録番号の情報は左へ8ビットだけシフトさせる。図-7はこの格納方法である。

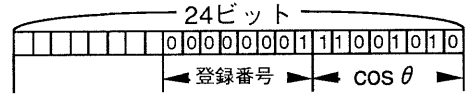


図-7 マスク画像への情報格納

以上の方法で生成されたマスク画像には、登録番号と $\cos\theta$ の情報が同時に格納されることになる。グローシェーディングでレンダリングするため、メッシュ節点から外れる場所の $\cos\theta$ は線形内挿により与えられる。厳密には線形内挿では問題があるが、メッシュ分割を細かくすることで十分な近似精度を得られるものと思われる。

反射・透過映像の生成においては、各画素に格納された $\cos\theta$ の情報を利用して、入射角別の反射率や透過率を参照することになる。ここでは各入射角における反射率の垂直入射における反射率の比 $C_r(\theta)$ と、各入射角における透過率の垂直入射における透過率の比 $C_t(\theta)$ を用いて、入射角度別反射率・透過率を参照することを考える。 $C_r(\theta)$ や $C_t(\theta)$ については、以下に示すような $\cos\theta$ の多項式で近似する。

$$C_r(\theta) = \sum_{i=1}^n a_i \cos^n \theta \quad (11)$$

$$C_t(\theta) = \sum_{i=1}^n b_i \cos^n \theta \quad (12)$$

$n$ については近似精度にあわせて上限を定める。 $a_i$ や $b_i$ については、実際のガラスの入射角別の反射率・透過率を基に最小2乗法で決定する。

任意の入射角における反射率は、垂直入射時の反射率 $r_0$ と $C_r(\theta)$ を用いて、

$$r(\theta) = r_0 \cdot C_r(\theta) \quad (13)$$

と与えられる。同様に任意の入射角における透過率も、垂直入射時の透過率 $t_0$ と $C_t(\theta)$ を用いて、

$$t(\theta) = t_0 \cdot C_t(\theta) \quad (14)$$

と記述できる。マスク画像の各画素に格納された $\cos\theta$ の値と、式(11)~式(14)より入射角特性を考慮しながら、反射・透過映像を生成することができる。

## 7 分光特性の考慮

これまででは取り扱う物理量を輝度の一次元で考えてきたが、ガラスの色表現を実現するためには、図-8に示すような分光特性を考慮した波長別の計算（n次元）に拡張する必要がある。

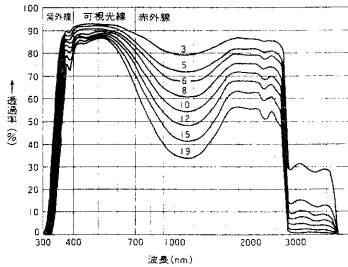


図-8 ガラス反射率・透過率の分光特性

しかしながら、

- 1) 波長別の計算は、本稿の主旨である反射・透過映像の高速生成にとって大きい障害となること、
- 2) 厳密な色再現が要求されるのでなければ、RGB三次元の計算でも十分実用に耐え得ること、

から、以下RGB三次元での反射・透過映像生成手法について述べる。

まず分光反射率からRGB別の反射率を求めるために、以下の計算を行う。

$$r_R = \int_V \rho(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda \int_V \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

$$r_G = \int_V \rho(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda \int_V \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad (16)$$

$$r_B = \int_V \rho(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda \int_V \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (17)$$

ただし、 $r_R, r_G, r_B$ はRGB別反射率、 $V$ は可視光域、 $\rho(\lambda)$ は分光反射率、 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ はRGBの等色関数、である。同様に分光透過率からRGB別の透過率を求めるために、以下の計算を行う。

$$t_R = \int_V \tau(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda \int_V \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad (18)$$

$$t_G = \int_V \tau(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda \int_V \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad (19)$$

$$t_B = \int_V \tau(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda \int_V \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (20)$$

ただし、 $\tau(\lambda)$ は分光透過率である。

色を考慮する場合であっても、一次元の場合と同じく反射映像、透過映像を別々に生成して重ね合わせることに変わりない。フルカラーであれば、一画素にはRGB各々8ビット（256階調）の情報が格納されている。これをRGB三成分に分離して、式(8)、式(9)をRGBごとに適用するだけのことである。この際のガラスの種類に応じて式(15)・式(20)で与えられるRGB別反射率・透過率を使い分けることで、ガラスの様々な色表現が可能となる。

## 8 適用事例

ここでは、晴天、曇天、夜間等の外界条件やガラスの品種を変化させて、アトリウム意匠検討を試みた。ガラス面に映り込む対象は、天空そのものと、直射日光や天空光を受けた周辺建築物である。そこで直射日光や天空光が有するスペクトルを前処理で算出し<sup>[11]</sup>、これに基づいて周辺建築物をレンダリングした。また天空についても、図-9に示すような半球上のメッシュにより形状を与えることで、映り込みを計算を可能とした。

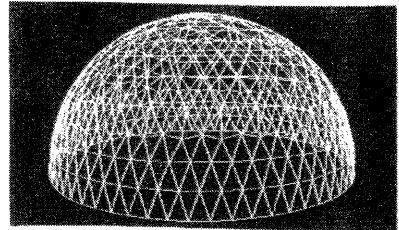


図-9 天空表示のための半球メッシュ

透過像の対象はアトリウム空間である。これについては、アトリウム空間内の直射日光、天空光、地面反射光による直接照度計算<sup>[12]</sup>と、漸進的ラジオシティ法<sup>[13]</sup>による間接照度計算に基づいてレンダリングした。画像生成結果を図-10に示す。いずれもステラ社のGWSを用いて計算した。画像解像度は1280\*1024で一枚当たりの生成時間は約3分ほどである。

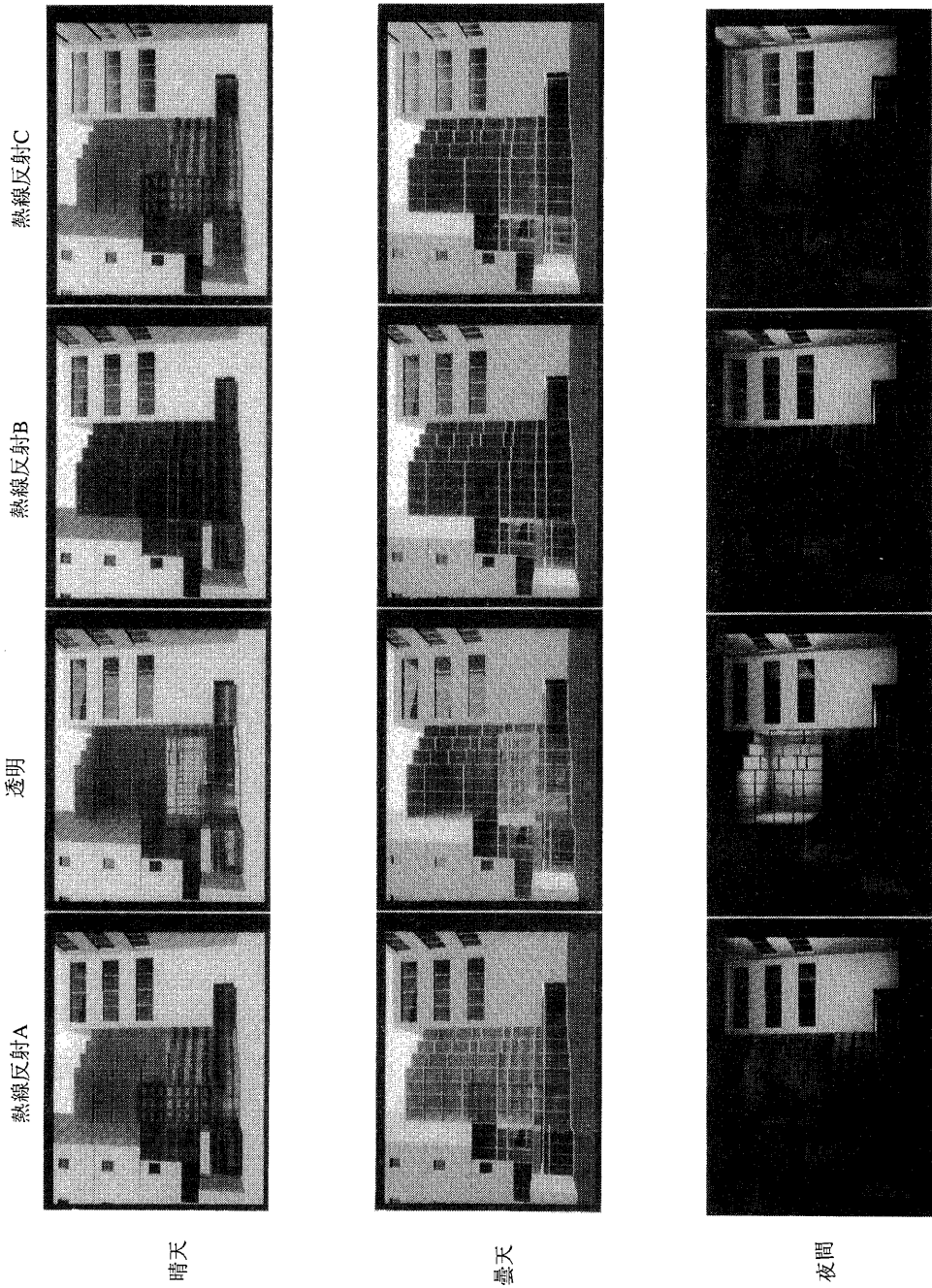


图-10 画像生成結果

図-10のケースでは、異なる平面式を持つガラス面が17種類あり、その分だけ生成時間を要している。しかしながらガラスの物性を考慮しながらレイトレーシングを行うことを考えると、本稿のねらいである反射・透過映像の高速生成を実現できたと言える。反射・透過映像を伴うアニメーションについては、発表当日に報告する予定である。

## 9 まとめ

建築用ガラスの多くが平面ガラスであること、建築空間のスケールとガラスの厚みからして、屈折効果が無視しえることから、本稿ではレイトレーシングとは異なる反射・透過映像の生成手法を示した。本手法は反射映像と透過映像の画像合成を基本としており、レイトレーシングのような交点探索を一切行わない。したがって反射・透過映像を高速に生成することができる。

またガラスの意匠性に大きく関与する、ガラス反射率・透過率の入射角特性や分光特性を映像生成プロセスに取り込むことで、現実に近い出力を可能とした。本手法はガラスに限らず鏡面反射が生じる部材のレンダリングにも適用できる。今後は、多様なガラスの意匠検討や、本手法のメリットを活かしたアニメーション作成に展開していく予定である。

## 参考文献

[1] 西田友是、中前栄八郎：スペクトルを考慮した天空光のシェーディングモデル、情報処理学会第36回全国大会1Z-1、1988

[2] 尊田嘉之、樋口作夫、北村由美子、大柿聡：アトリウム内の光環境解析（その1、形状複雑性に対応する光環境解析手法）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992、pp.297-298

[3] Choen, Michel F., Sheencang 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