

## 分光特性を考慮した種々のCG画像の生成法

西田 友是

広島修道大学 経済科学部 〒731-3195 広島市安佐南区大塚東 1-1-1

UEI リサーチ 〒113-0034 東京都文京区湯島 3-1-3 MS ビル

E-mail: nishita@shudo-u.ac.jp

## Various Methods of CG Image Synthesis Taking into account of Spectrum

Tomoyuki NISHITA

Hiroshima Shudo University

UEI research

**アブストラクト** CGにおいてリアリティを表現するには、モデルの複雑さや照明モデルの忠実さに依存する。本稿では、照明モデルで特に分光特性まで考慮してリアリティをます方法を議論する。すなわち、光の回折、光の薄膜による干渉、回折格子による高輝度光源の見え方、グレア、空・水の色（散乱）、カメラのレンズ（奥行検出）、相互反射、霞の効果（吸収）、サブサーフェススキヤタリング、NPRとして顔料の混色、赤外線画像から雲の3次元化について紹介する。

## 1. はじめに

1970年から図形処理(当時はCGという言葉はなかった)の研究をはじめて43年が経過しました。

CGは1963年のサザーランドのスケッチパッドの研究が始まりとされており、本年で丁度50年になる記念すべき年である。CG分野でない人のため、本稿ではこの40年間での陰影処理あるいは照明効果に関するCG研究の歴史と研究の現状をを最初に紹介する。特に、分光分布を考慮した3DCGレンダリング技術を論じます。

CG分野では、1974年に発足したSIGGRAPHが最も権威があり、大きな影響を与えています。表1に、筆者とSIGGRAPHを含むCGの歴史年表を示します。

また、図2に、著者の研究室の研究トピックを表します。このように、照明効果、形状処理とレンダリング、自然物の表現、インタラクティブ・レンダリング、非写実的表現(NPR)、およびComputational photographyと広範囲に及びます。

その中でも、本稿では、筆者が最も早くから研究している照明効果に焦点を当てて紹介したいと思います。表2に各研究カテゴリーの内容を示します。

表1 CGの歴史および著者の研究史

1963	サザーランドの研究；CGの開始
1970	学部時代 西田研究開始
1972	最初の論文：隠線消去
1974	SIGGRAPH 開始
1979	研究再開
1981	非一様点光源 SIGGRAPH 裏表紙
1982	線光源 SIGGRAPH アートショウ入選
1983	SIGGRAPH エレクトリックシアター入選
1985	Radiosity 法を SIGGRAPH で発表
1993	地球大気の発表
1994	水中の光学的効果発表
2003	サウンドレンダリング発表
2005	S.A.Coons 賞を受賞
2006	画像電子学会 西田賞創設
2012	反射分布関数など2件 SIGGRAPH 発表

## 2. リアリティの追求

CG研究の主な目標は、リアリティとインタラクティブ性である。リアリティは物体の複雑さと陰影表現(材質感も)に依存する。また、インタラクティブ性は、GUI(グラフィカル・ユーザー・インターフェイス)の有用性は勿論だが、計算時間はハードウェアの進歩とアルゴリズム・データ構造に依存する。

リアルさは、データの複雑さ(曲面も)に比例すると言われていたが、むしろ陰影の表現力の方が効果があると言える。すなわち、半影や間接照明(相互反射)が効果的である。他にも照明(あるいは



は光学的) 効果の表現としては、集光効果(コー  
スティック)、光跡、大気散乱(空や水の色、霞の  
効果)、グレア、反射特性・材質(BRDFの編集、  
多重散乱による半透明感)があげられる。図1に  
shading modelの構成要素を示している。そのうち  
でアンダーラインを施している要素は、筆者がパ  
イオニアの一人である。

表2 著者の研究テーマの範囲

リアルな画像の生成；	リアルさは照明効果を忠実に計算。そのため、種々の光源に対するシェーディングモデルの開発
自然景観の表示；	CG画像と写真との合成法、水、空、雲等の表示を粒子の散乱特性を考慮したリアルな画像の生成法
形状処理とその応用；	多角形に近似しない高精度の曲面(パラメトリック曲面、メタボール曲面)表示法の開発、および自由形状変形法
2D形状変形；	モーフィング、ワーピング、形状補間
NPR；	ノンフォトリアリステックレンダリング(墨絵、ペン&インク風)
WebCG；	CG教育への応用、グラフィックスAPI(Java)
Computational Photography；	焦点ボケ(奥行検出)、ブレの解除、画像合成

分光を考慮するレンダリングとしては、屈折を考慮した虹の表示、構造色、金属やコーティング色の研究などがなされている。著者のこれまでの分光に関連する研究を時系列に以下に列記します。

相互反射におけるカラーブリーディング(1985)[1]、空間輝度分布を持つ天空光(1986)[2]、大気粒子の光減衰による霞の効果(1989)[3](CG画像と写真とのモンタージュに利用)、大気中の粒子の散乱光(1987)[4]、まつ毛による光の回折(1990)[5](夜間のドライブシュミュレータに利用)、地球大気の大気散乱光(1993)[6]、曲面間の相互反射(1993)[7]、波により生じる光跡・集光などの水中の光学的効果(1994)[8]、天空光により照射された室内の照明設計(1996)[9]、多重散乱による雲や空の色(1996)[12]、多重散乱による空の色分布の計算()[10, 11]、分光分布をもつ天空光により照射される建築物の高速表示(1996)[12]、多重散乱光による積雪の色(1999)[13]、衛星画像による3次元雲の生成(2000)[14]、散乱光による海の色(2003)[16]、グレア(2004, 2005)[17, 19, 21]、薄膜による光の干渉光の高速表示(2004)[18](動的に変形するシャボン玉の色)、NPR(顔料の混色)(2005)[20]、前処理計算による相互反射光の高速化(2007)[22]、大局照明のための会話的照明設計(2007)[23]、カラーフィルター付きカメラレ

ンズによる奥行検出(2008)[24]、分光分布を持つ環境光光源(1996)[11]、反射・屈折光(分光)の高速計算(2008)[25]、動的に色変化する環境光源のモデル(2009)[26]、媒質中の散乱光(2010)[27]、オーロラの色(2011)[28]、全周波数光源による変形物体のリアルタイム表示(2012)[29]、鏡面反射面の高速表示(2012)[30]、表面下散乱(サブサーフェススキヤタリング)(2013)[31]などであり、次節でこれらの内容を紹介します。

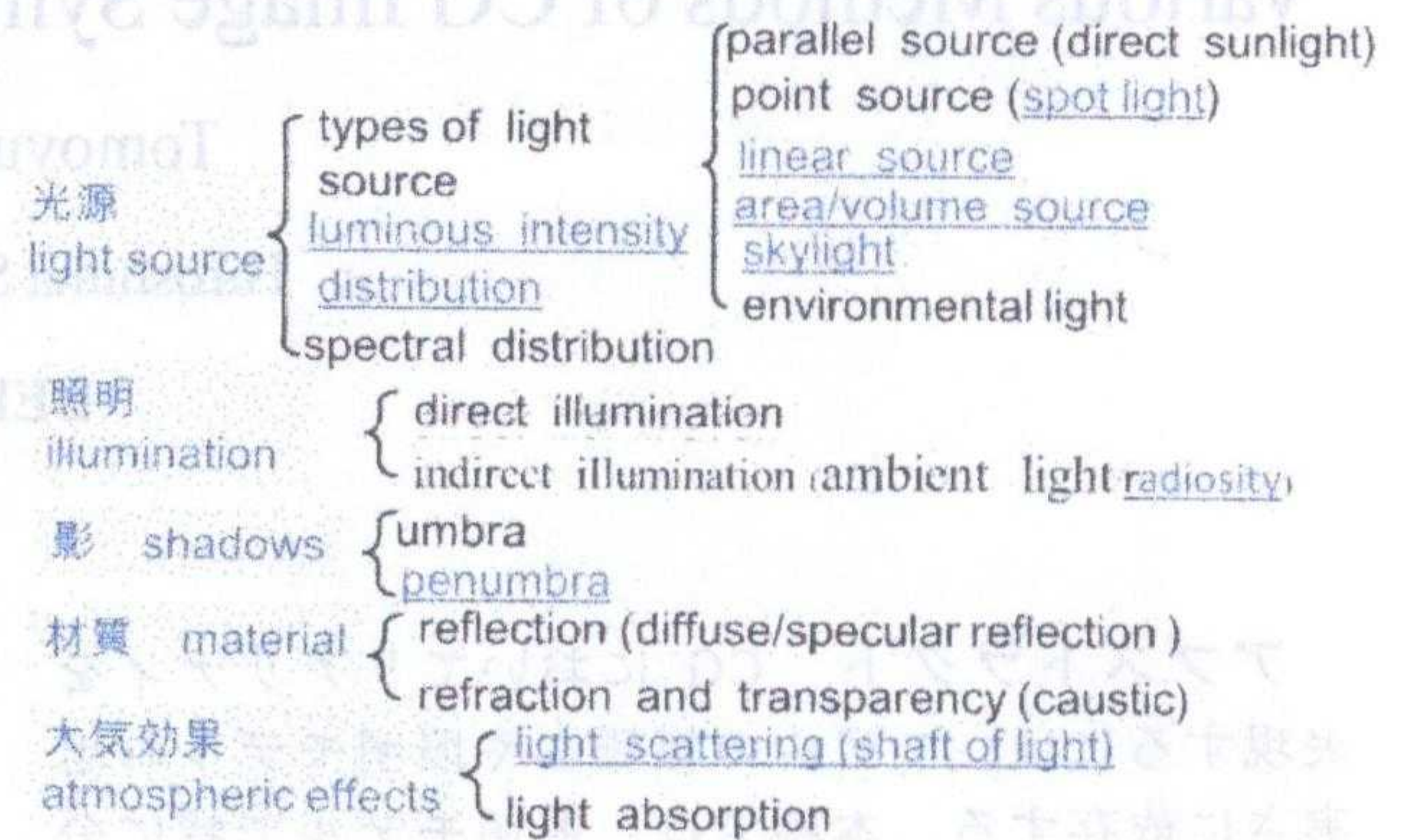


図1 Shading Model

3. 照明モデルにおける分光特性

CGにおける照明モデルは、光源、物体の材質、媒介材質が重要な要素である。

分光特性に注目すると、光源においては光源のスペクトル、配光、面積を持つ光源では空間輝度分布も考慮する必要がある。光源は人工光源と自然光があり、天空光などの自然光におけるスペクトル分布も無視できない。

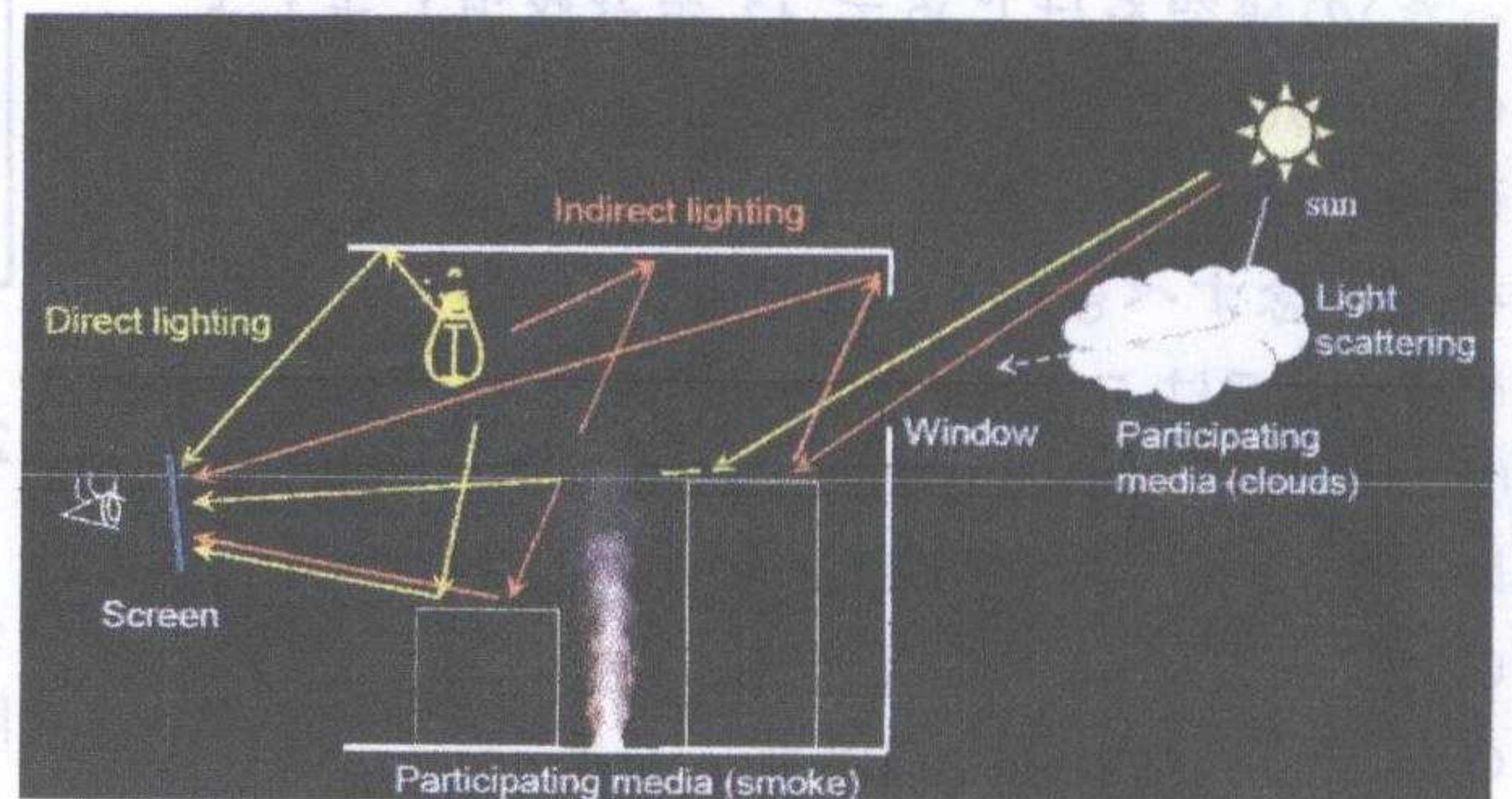


図2 光の経路(散乱光)

物質ですとそのBRDF(双方向反射分布関数)が重要であり、表面のみで反射する鏡面反射、物質内部で散乱光による拡散光の考慮が一般的である。近年では肌のような半透明物質の表現として表面下散乱(サブサーフェス・スキヤタリング)も重視されるようになってきている。



光源と物体、物体と視点の間には媒質(関与媒質と呼ばれる)が存在し、それによる散乱・吸収も重要である。さらに物体から反射・屈折した光のさらなる反射など(相互反射;総称してグローバルイルミネーション)も無視できない。

また、屋内と屋外に分類して照明効果を考えることもできる。屋外の方がスペクトルを考慮することがやや複雑である。

自然物のCGは近年不可欠な技術となっている。自然物としては、木、山、海などの形状モデルも重要であるが、むしろ空、雲、空の色、煙などの自然現象がリアリティに貢献する。こうしたものは大気や雲の分子・粒子での散乱光であり、これらは波長によって散乱特性は影響する。したがって、自然物に有用な粒子による散乱を最初に述べ、身近なものを対象に以下に説明する。

### 3.1. 粒子による散乱・吸収(関与媒質)

大気や水蒸気などの粒子を考慮した光学的効果(特に散乱・吸収)も無視できない。屋外(自然界)では当初は霞の効果には注目されていた。室内では窓から入る光が粉塵などを照射し、光跡が見られる。またスポットライトや灯台の光でも光跡が見られる。こうした効果は日常的にみられるものであり、こうした効果の表現が望まれていた。筆者は1985年に、スポットライトによる照射された粒子の散乱光(近年ではボリュームライトと称す)を表現した。これを始めとして、煙の表示、窓からの光跡の表現法を発表した。さらに、自然現象に関し、子供用のハンドブックで空はなぜ青いかの解説を読み、それで粒径と散乱光の波長の依存性を知り、地球大気の色、水の色などの表現法を開発した。

図2のように太陽光あるいは人口光源がからの光は反射または複数回の反射を経て視点に入射される。特に粒子状の関与媒介がある場合は、散乱・吸収が重要である。視線に届く光は本来視線上の光を積分する必要があるが、近年はサンプリングを用いる方法が提案されている。関与媒質を考える場合、粒子による散乱・吸収を考慮する。いずれも波長に依存した関数となる。散乱の場合位相関数が重要でこれは粒径に依存する。散乱光は空の色を決める。その空の色の分布が天空光の分布を決める。この天空光の輝度分布は太陽の位置により変化する。この天空光は環境光原とみなされ、環境光源で照射された室内の明るさを効率よく計算する方法を開発した。

CGでは3次元物体を2次元スクリーンに表示するため、遠近表示が重要であり、これは霞の効

果といわれる。これは空の色の関連がある。一様な分布の場合、距離に関し指数関数的に減衰する。ただ、波長ごと吸収のレベルが違い、減衰曲線が波長で異なり、無限距離になると空の色になる。そこで筆者らは代表的波長に関して色の変化を測定し、それを関数化して、霞の効果を配慮できる全天候に対応した写真とCG画像の合成技術を発表した[3]。

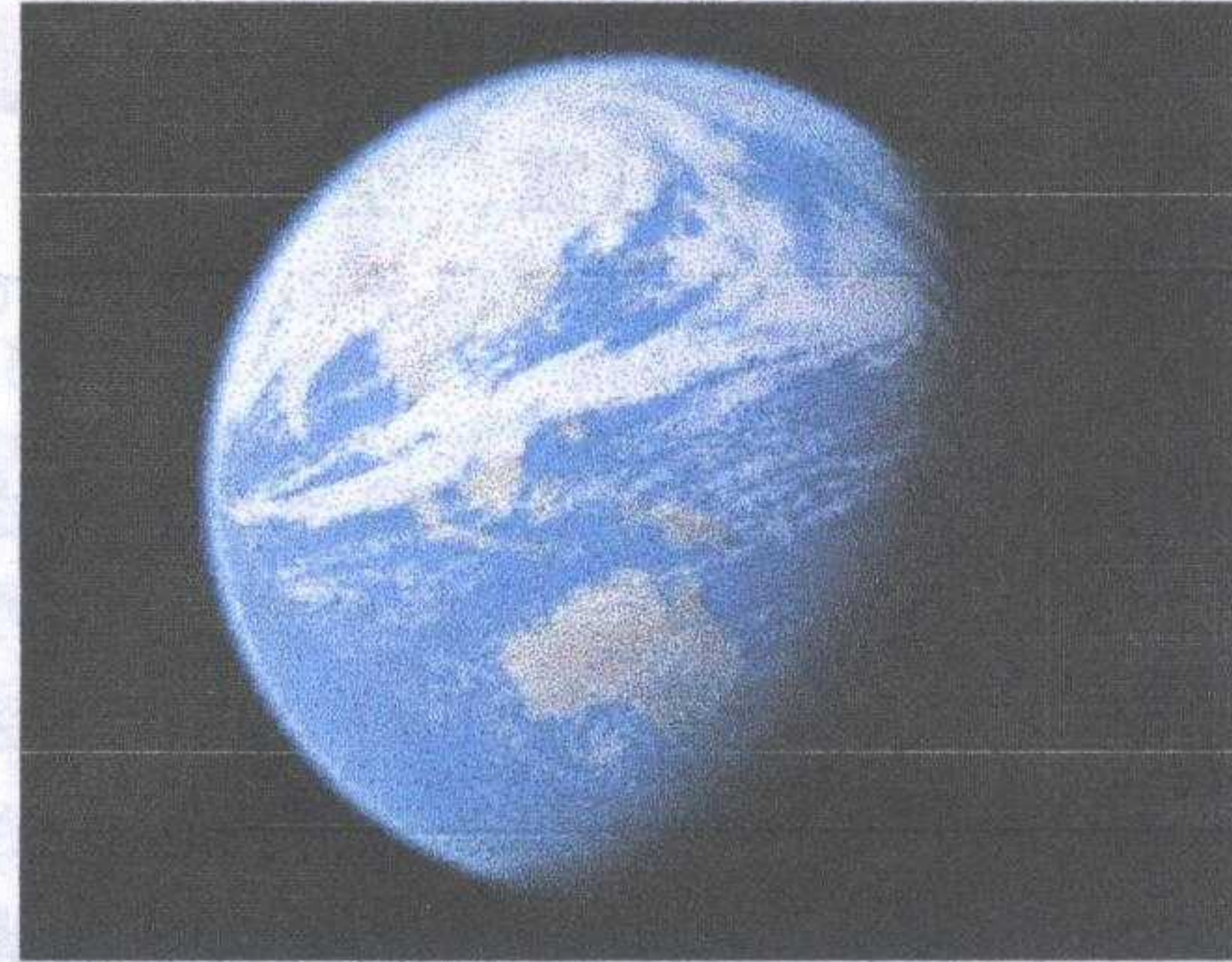


図3 地球大気の色計算



図4 ステンドグラスを通過した光跡



図5 水中の光学的効果(光跡、コーステック)

地球規模で考えると地球を取り巻く大気を構成する粒子(空気分子)の散乱光を計算すると宇宙から眺めた青い地球が表示できる[6]。(図3参照)

また空の色は太陽の位置に依存して色が変わる。これは太陽光の大気の通過距離に以前し、それが波長に依存するか空の色分布が計算できる。空には雲があるが、雲は水蒸気からなり、その散乱光で雲の色は決まる。特に太陽光のみでなく、天空光にも影響され、これらは波長に依存した分布を持つ。密度分布の変化が大きくても効率的にサンプリングする方法で雲や大気の色を計算する



方法を発表した例を図6に示す。



図6 散乱光の計算(雲、空、大気)

地上の積雪についても同様に粒子の散乱光で色が決まる[10]。

室内ですと、煙や粉じんなどの粒子が照射されて光跡を生じる。多重散乱による雲、空の色(1996)[9][12]、媒質中の散乱光(2010)[18](図4参照)、雷の光により大気中の粒子や雲が照射される場合の表現を開発、またオニロラの色も開発した(2011)[22]

水中においては、波の集光効果により光跡を生じ水底や魚などはコースティックを生じる。これらは水分子の散乱光で生じ、波長に依存する。大気散乱[6]、光蹟・集光などの水中の光学的効果(1994)[8](図5参照)

人の肌の色や大理石などのやや半透明なものはサブサーフェスキャタリング(2013)[24]により表面色を計算できる。

### 3.2. 回折、干渉



図7 回折光の表示

光の反射、散乱に加えて、光の干渉、グレア効果、薄膜による光の干渉、レンズの効果などと種々な光学手効果も扱う必要がある。夜間車を運転すると街頭などが放射線状に光り、それは虹色のように変化している。これは小さな穴を透してみるためと、まつ毛のような細い線状による光の回折(1990)[4]である(図7参照)。

シャボン玉のように薄い膜の場合、薄膜による光の干渉光がみられる(2004)[13](図8左参照)。強い光の光源の周りにはグレアが見れ(図8右参

照)、波長による色分布を生じる。これをモデル化した(2005)[15]。

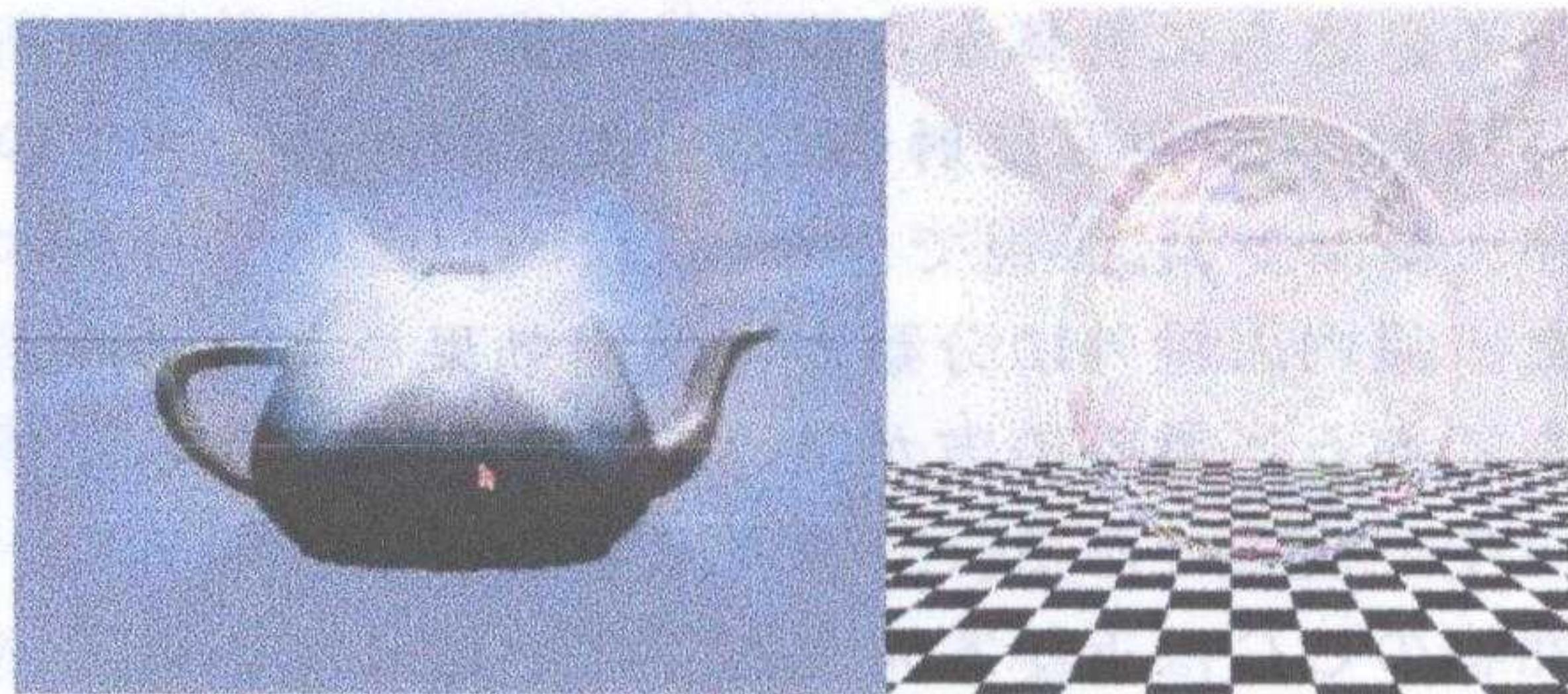


図8 グレアおよび薄膜の干渉

### 3.3. 光源の特性、環境光源

現実の世界には、点光源以外の光源が一般的であり、光源が大きさをもたないものはない。したがって、光源に大きさがある限り必ず影は柔らかい影、すなわち半影を有す。従来のCGではこうした光源には注目されてなかったが、筆者は影に注目し、線光源をはじめ各種の光源による照明モデルを発表した。



図9 変化する環境光(天空)による照射

光源は2つに分類ができる。一つは局所光源と環境光源(あるいは遠方光源)である。

環境光源は半径の大きい半球状の光源であり、その球面上の輝度(スペクトル)の空間分布があるため、計算は複雑である。前処理計算で光伝達関数を求めることで効率よく処理できる[23](図9参照)。

### 3.4. 相互反射

室内の表示を考えると、必ず壁などからの反射で部屋は照らされる。すなわち、光の相互反射による間接光は無視できない。筆者は世界に先駆けて1984年に照明学会において相互反射を考慮した表示法を発表した。その後1985年のSIGGRAPHでコネル大と同じセッションでの発表[1]となった。彼らは熱放射の分野を基本に研究しており、この方法をラジオシティ法と称し、この名前が一般化した。

ラジオシティ法は大局照明の基本となったものであり、その効果は下記のようなものである。

- 1) 影が半影(ぼやけた影)を伴う。
- 2) 直射光が届かない部分も、相互反射による間接光により照射される。
- 3) 反射面の色が隣接する面に影響する  
特に、3)はカラーブリーディングと呼ばれ、反射



にともない物体の色が変化して見える。

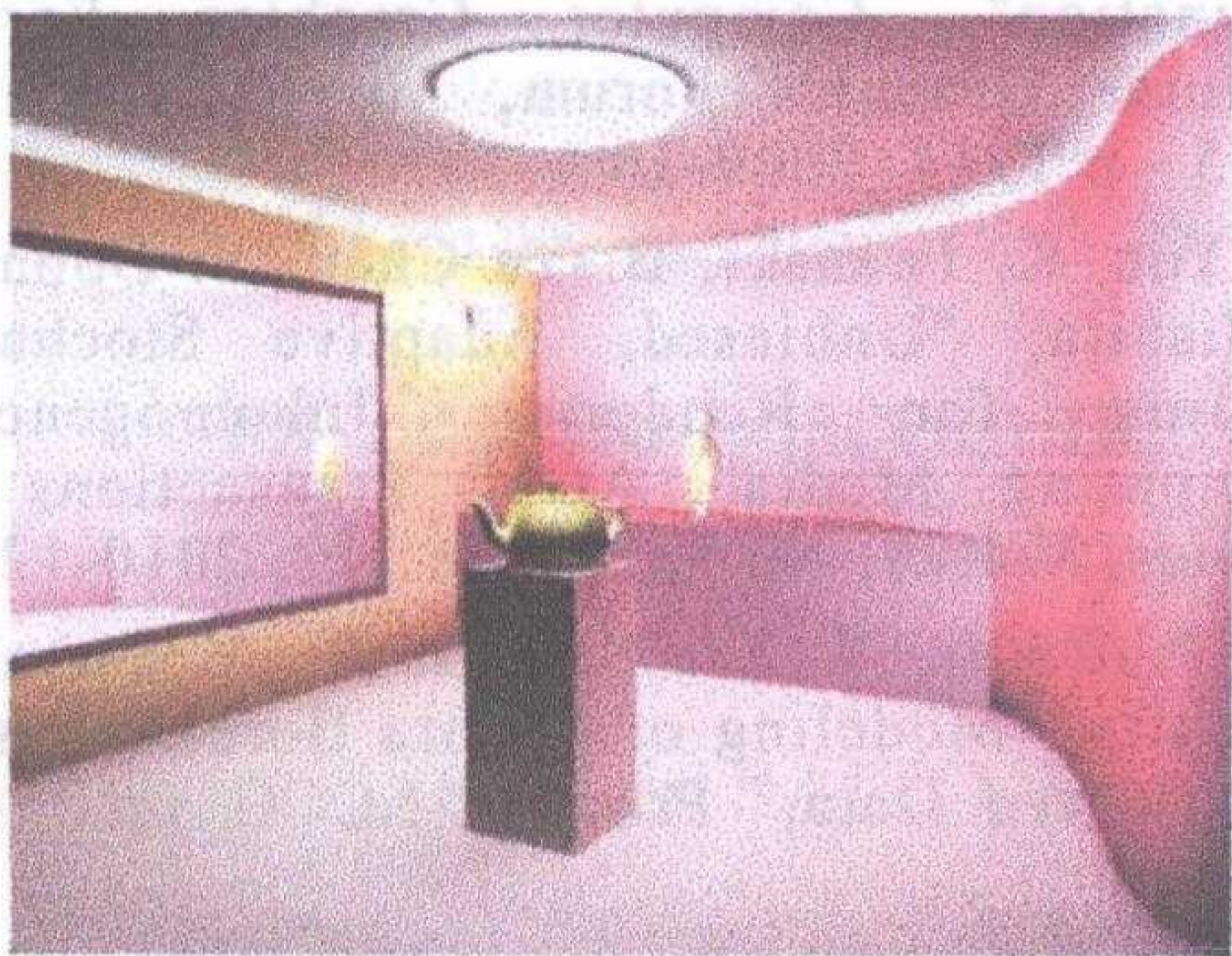


図 10 曲面間の相互反射(カラーブリーディング)

図 10 は曲面に対するラジオシティ法の計算例である。ここでは曲面のレイトレーシング法のために開発された Bezier Clipping 法で遮蔽効果を計算している。

### 3.5. 画像フィルタ

上のは異なり入力時に波長の情報を用いることもできる。イメージベースレンダリングと言われる技術として知られる。著者らは衛星画像からの 3 次元雲を生成しアニメーションを作成した(2000) [12], この場合、衛星画像は波長のことなる画像も撮影される。赤外線は雲の厚みに関係するから、こうした画像から 3 次元の雲を推測でき、任意の太陽方角から照射された雲を任意の方向からの映像として表現できるようになった。

カラーフィルター付きカメラレンズによる奥行検出(2008) [17]、波長により屈折が異なるので、カメラレンズの前に RGB フィルターをつけると、屈折率の違いで各色成分で位置がずれた画像ができる。それから奥行を検出でき、背景と前景の分離やステレオ表示の応用などができる [24] (図 11 参照)



図 11 フィルター付レンズによる奥行検出

### 4. おわりに

本稿では、長年にわたる CG 研究の中で、照明効果、特に分光分布を考慮したレンダリングに関連するものに焦点を絞り紹介した。これらは、筆者が最初に SIGGRAPH で発表したものを、共同研究者や研究室学生が改良を加えインタラクティブな速度でかつ高精度レンダリング法を実現し、より実用性の高いものに洗練した。

CG 研究の成果は次のようである。i) リアリティおよび使い易さとしての支援ツールとして確立した。ii) 数理の力は自然物のシミュレーションに有効で、かつリアルタイム化にも貢献した。すなわち、物理則に基づく自然現象のアニメーションの精度を向上させた。特にダイナミクス(破壊、切断、流体など)や光学特性(粒子による散乱・吸収による、空、大気、雲などの色)を考慮したモデルがリアリティに貢献している。

### 文献

- [1] T. Nishita and E. Nakamae, "Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection," *Computer Graphics*, Vol.19, No.3, 1985-7, pp.23-30
- [2] T. Nishita and E. Nakamae, "Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Illuminated by Sky Light," *Computer Graphics*, Vol.20, No.3, 1986-8, pp.125-132
- [3] E. Nakamae, K. Harada, T. Ishizaki, T. Nishita, "Montage : The Overlaying of The Computer Generated Image onto a Background Photograph," *Computer Graphics*, Vol.20, No.3, 1986-8, pp.207-214.
- [4] T. Nishita and E. Nakamae, "A Shading Model for Atmosphere Scattering Considering Luminous Intensity Distribution of Light Sources," *Computer Graphics*, Vol.21, No.3, 1987-7, pp.303-310.
- [5] E. Nakamae, K. Kaneda, T. Okamoto, T. Nishita, "A Lighting Model Aiming at Drive Simulators," *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, 1990-8, pp.395-404.
- [6] T. Nishita, T. Shirai, K. Tadamura, E. Nakamae, "Display of The Earth Taking into account Atmospheric Scattering," *Proc. of SIGGRAPH'93*, 1993-8, pp.175-182
- [7] T. Nishita, E. Nakamae, "A New Radiosity Approach Using Area Sampling for Parametric Patches," *Computer Graphics Forum*, Vol.12, No.3, 1993, pp.385-393.
- [8] T. Nishita, E. Nakamae, "Method of Displaying Optical Effects within Water using Accumulation-Buffer," *Proc. of SIGGRAPH'94*, 1994-7, pp.373-380.
- [9] Y. Dobashi, K. Kaneda, E. Nakamae, H. Yamashita, T. Nishita, K. Tadamura, "Skylight for Interior Design," *Computer Graphics Forum*, Vol.13, No.3, 1994-9 pp.85-96.
- [10] T. Nishita, Y. Dobashi, E. Nakamae, "Display of Clouds Taking into Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light," *Proc. of SIGGRAPH'96*, 1996-8, pp.379-386.
- [11] T. Nishita, Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, "Display Method of the Sky Color Taking into Account Multiple Scattering," *Pacific Graphics 96*, 1996-8, pp.117-132,
- [12] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Nishita, "Method for Calculation of Sky Light Luminance Aiming at an Interactive



- Architectural Design," Computer Graphics Forum, Vol.15, No.3, 1996-9, pp. 112-118.
- [13] T. Nishita, K. Iwasaki, Y. Dobashi and E. Nakamae, "A Modeling and Rendering Method for Snow by Using Metaballs," Computer Graphics Forum, Vol.16, No.3, 1997-9, pp.357-364
- [14] Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Yamashita, T. Okita, T. Nishita "A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds," Proc. of SIGGRAPH'2000, 2000-7, pp.19-28
- [15] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "A Fast Rendering Method for Refractive and Reflective Caustics Due to Water Surfaces," Computer Graphics Forum, Vol.23, No.3, 2003-9, pp.601-609
- [16] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita "A Volume Rendering Approach for Sea Surfaces Taking into Account Multiple Scattering Using Scattering Maps" Proc. of Volume Graphics 2003, pp.129-136, 2003-7
- [17] M. Kakimoto, Y. Mukai, T. Haga, T. Nishita, T. Naemura, H. Harashima "A Real-Time Glare Rendering Technique Taking into Account Surface Reflection Attributes", Journal of IIEEJ, Vol.32, No.4, pp. 336-345, 2003-7
- [18] K. Iwasaki, K. Matsuzawa, T. Nishita, "Real-time Rendering of Soap Bubbles Taking into Account Light Interference" Proc. CGI 2004, 2004-6, pp.344-348,
- [19] M. Kakimoto, Naemura, Harashima, T. Nishita, "Glare Generation Based on Wave Optics," Proceedings of IEEE 2004 Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, pp.133-142, 2004-10
- [20] H. Matsui, H. Johan, T. Nishita, "A Method to Create Colored Pencil Style Images by Drawing Strokes Based on Boundaries of Regions" Proc. CGI2005, pp.148-154, 2005-6
- [21] M. Kakimoto, K. Matsuoka, T. Nishita, T. Naemura and H. Harashima. "Glare Generation Based on Wave Optics," Computer Graphics Forum, Vol. 24, No. 2, pp.185-193, 2005-7
- [22] K. Iwasaki, Y. Dobashi, F. Yoshimoto, T. Nishita, "Precomputed Radiance Transfer for Dynamic Scenes Taking into Account Light Interreflection," Proc of Eurographics Symposium on Rendering 2007, 2007-6, p.35-44
- [23] Y. Yue, K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "Global Illumination for Interactive Lighting Design using Light Paths Precomputation and Hierarchical Histogram Estimation," Proc. of Pacific Graphics 2007, 2007-10, pp.87-96
- [24] Y. Bando, Bing-Yu Chen, T. Nishita, "Extracting Depth and Matte Using a Color-Filtered Aperture, ACM Trans. on Graphics, Vol.27, No.5, Article 134 2008-12, pp.1-9,
- [25] M. Kakimoto, G. Chun, T. Nishita, "REAL-TIME REFLECTION AND REFRACTION ON A PER-VERTEX BASIS," Journal of IIEEJ, Vol.37, No.3, 2008-5, pp.196-205,
- [26] Y. Yue, K. Iwasaki, Bing-Yu Chen, Y. Dobashi, T. Nishita, "Interactive Rendering of Interior Scenes with Dynamic Environment Illumination", Computer Graphics Forum, Computer Graphics Forum, Vol. 28, No. 7,, p.1935 - p.1944, 2009-10
- [27] Y. Yue, K. Iwasaki, B.-Yu Chen, Y. Dobashi, T. Nishita, "Unbiased, Adaptive Stochastic Sampling for Rendering Inhomogeneous Participating Media" ACM Transactions on Graphics, Vol.29, No.5, Article 177, 2010-12
- [28] T. Ishikawa, Y. Yue, K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "Modeling of Aurora Borealis Using the Observed Data," Proc. of SCCG, pp.35-38, 2011-4.
- [29] K. Iwasaki, W. Furuya, Y. Dobashi, T. Nishita, "Real-time Rendering of Dynamic Scenes under All-frequency Lighting using Integral Spherical Gaussian", Computer Graphics Forum, pp.727-734, 2012-5
- [30] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "Interactive Bi-scale Editing of Highly Glossy Materials," ACM Transactions on Graphics, Vol.31, No.5, Article 144, 2012-12
- [31] M. Shinya, Y. Dobashi, K. Iwasaki, M. Shiraishi, T. Nishita, "A Simplified Plane-Parallel Scattering Model for Rendering Densely Distributed Objects such as Foliage," Journal of Information Processing Information Processing Society of Japan (IPSI), vol. 21, No.2, pp.349-357, DOI: 10.219/ipsjip.21.349, 2013-4

#### 著者紹介

昭和 48 年広島大学工学研究科修了、同年マツダ入社。昭和 54 年から福山大学電子電気工学科講師、昭和 63 年から 1 年間米国 Brigham Young 大学客員研究員、平成 2 年から福山大学教授。(平成 6 年から東京大学理学部非常勤講師を経て) 平成 10 年 10 月から東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻教授。平成 11 年から新領域創成科学研究科複雑理工学専攻教授。

CG に関して、3 次元物体のリアルな表現法、照明シミュレーション、景観予測、自由曲面の表示法、CG アニメーション、インタラクティブレンダリング等の研究に従事。工学博士。情報処理学会、画像電子学会、電気学会、電子情報通信学会、可視化情報科学会、ACM、IEEE 各会員。

平成 13 年から画像電子学会ビジュアルコンピューティング研究会委員長、平成 18 年から情報処理学会 GCAD 研究会主査。平成 21 年-22 年は画像電子学会会長。昭和 62 年情報処理学会から、研究賞(現山下記念研究賞)授賞。平成 17 年米国 ACM SIGGRAPH から Steven A. Coons Award を受賞、平成 18 年 NICOGRAPH から CG-Japan Award を受賞。平成 18 年 3 月画像電子学会において、CG 関連の優秀論文の著者に与えられる賞「西田賞」が創設された。