

CG, VRに関する造形情報の 光波理論による考察

Theoretical Study of Optical Waves for Image Information on CG and VR

宮崎保光

Yasumitsu Miyazaki

あらまし

パソコン、ワークステーションによってCG、VR作成が展開されているが、像作成において、もっとも重要である、光波のレイトレーシング、シェーディング、レンダリングなどの光学的現象に関した手法を、より詳細なモデル作成にするために必要な光波動特性について示している。光波理論に基づいた、分光特性、回折特性、表面の凹凸による光波の統計的性質について論じている。波動としての光波の基本的性質を論じ、CGおよびVRにおけるモデル化に現実感を与えるために必要な要因を示している。また、造形作品の制作の際に必要な、物体と光波の相互関係についての基本的特性をも示している。マックスウェルによって示された電磁理論による像形成の基本を示す。

Abstract

CG and VR technical tools are well developed with rapid development of personal computer and work station computer. In this paper, most important characteristics of optical waves concerned with precise image models are studied, for technical methods of optical phenomena such as ray-tracing, shading and color rendering. Spectroscopic, diffraction and statistical characteristics of optical waves by random surface are discussed, based on optical wave theory.

Fundamental characteristics of optical waves concerned with CG and VR are shown for precise and real image models. For art image processings of paintings and sculptures, basic properties of interaction between objects and optical waves are shown. Important factors of image production are discussed using Maxwell's electromagnetic theory.

1. まえがき

コンピュータの発展により、Mbits以上の多量の画像情報に関する情報伝送・情報処理・情報記憶の基礎・応用分野の進歩が著しい。これまでの、アナログ情報としてのテレビ、ビデオテープの技術のみの世界から、パソコン、ワークステーションによるデジタル情報としての画像情報の世界が広く展開されつつある。^[1~3]

とくに、造形・画像情報の代表であるコンピュータグラフィック(Computer Graphics)および仮想現実(Virtual Reality)の技術の進歩により、造形芸術、デザインの分野における表現・分析は、CG、VRによって大きな影響を受けつつある。CGに関しては、設計技術として、CAD(Computer Aided Design)はコンピュータの発達の当初の1960年代より開発されており、CGは、1963年MITのIvan Sutherlandにより、Sketchpad 描画、システムとして始められた。CGでは、形状モデルとして、ワイヤフレームモデル、サーフェスモデル、ソリッドモデルが示されており、R(赤)、G(緑)、B(青)のカラーモデルが用いられている。また、陰影付け(シェーディング)においては、周囲の環境光による輝度、入射光による拡散輝度によって示られている。CGの表現として、テクスチャマッピングによって表面の効果的画像の生成が行なわれている。CGの光学的解析法として、各種の計算的方法が用いられている。力学的運動解析も中心的課題である。^[4~6]

CADのためのCGとして、グラフィックシステム、座標変換、隠線、隠面処理の技術手法が用いられる。また、ピクセルごとに視線ベクトルを考察し、光線を追跡し、視線と交差し、物体から反射する色を考察する視線探索法(レイトレーシング、Ray-tracing)が用いられる。レイトレーシングでは、光源、影を考慮するとともに、光の反射、屈折、透過の現象を、物体との幾何学的関係として、モデル上で検討している。物体において、反射、吸収、拡散される光のエネルギーを計算するラジオシティ

法も用いられている。図形を、2次元着色し、3次元モデルに対応させるレンダリングも用いられている。視覚のみでなく、聴覚、触覚に刺激を加えることにより、現実の空間・時間とは違う、異なる空間・時間を体験出来る技術であるVRにおいてもCGは中心的課題である。

しかしながら、これらのCG技術においては、光波の物理的考察に基いた計算モデルとしては、精度の悪い近似法であるため、CGには十分な満足が得られていない。そのため、さらに、詳細な検討が必要である。ここでは、CGをさらに、現実感のあるものにするために必要ないくつかの課題を示す。また、これらは、平面、立体の造形技術の作品制作における視覚情報の基本的情報を示すことにもなる。

CG、VRの制作において、造形情報に関わる像作成、像再制作の特性に、光波の反射、色吸収、表面の凹凸が重要な要因であることを示し、それらの像作成に与える影響の特性を論じ、CG、VRの基礎を示す。マクスウェルによって示された、電界、磁界に関する光波の波動理論と物性論により、像形成の基本を示している。

2. 光波と像

CGにおいては、光波による物体からの反射波、あるいは、光源からの放射光線が人間の視覚に形成される像を、人工的に、コンピュータ処理によって、モデル化により作成する。この場合、芸術作品を制作する場合においても、対象物を視ることより、人間の脳によって情報処理する過程と類似の要素を有している。

このとき、第1過程は、光波により物体の画像情報が視覚に伝達されることである。^[6]

図1、2は、光波と視覚、コンピュータ Graphics の例

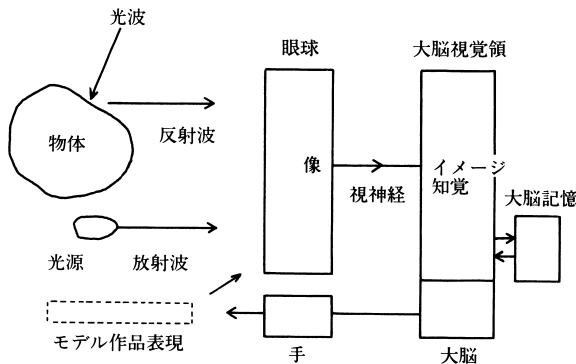


図1 光波と視覚

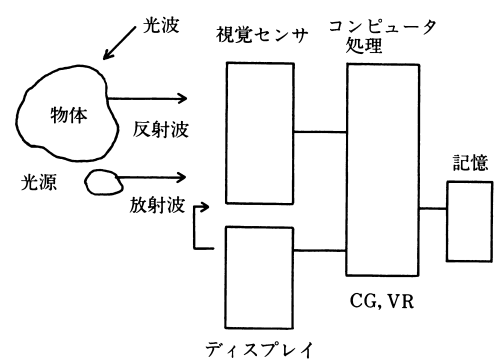


図2 光波とCG

を示している。感性、感覚は、大脳における視覚領と関連した領域、あるいは、コンピュータ処理の手法とモデルに依存している。像としてのパターン情報は、光波と物体の相互作用によって形成される。この場合、物体の形状、テクスチャー、色、の情報が眼球を通じ、あるいはセンサを通じ、中央処理部である大脳、あるいは、コンピュータに伝達される。像再生は、これらの情報によって形成される。

図3は、眼球の構造を示す。視覚の分解能である視力は、2点から放射する光波が1分の視角が知覚できるとき、視覚1.0という。このとき、網膜上では、5μmの間隔である。0.5分の視角のとき視力2.0という。1分の視角は、5m離れた位置では、1.5mm間隔に対応する。

適当な明るさは、0.01Lamberts であり、10μL~10Lは錐体視(明所視)、1mμL~10μLは杆体視(暗所視)とい

う。また、Lは $\frac{1}{\pi}$ cd/cm²、1 lxはlm/m²=meter candle

である。錐体視は波長420~680nm、杆体視は、400~640nmの視感度であり、ピークは、560nm、520nmである。

また、色の波長特性は、図4の分布をもつ。図4は、光の波長と色特性を示す。光束Fと放射束Pλの関係は、光度、照度、輝度に、標準比視感度V_λにより、

$$F = K_m \int P_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda \quad (1)$$

として与えられる。K_mは比例係数である。

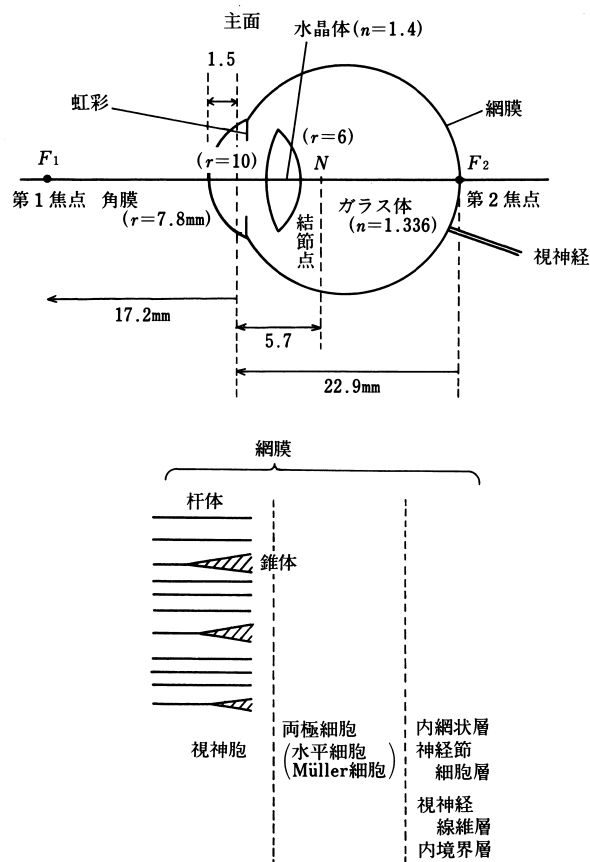


図3 眼球

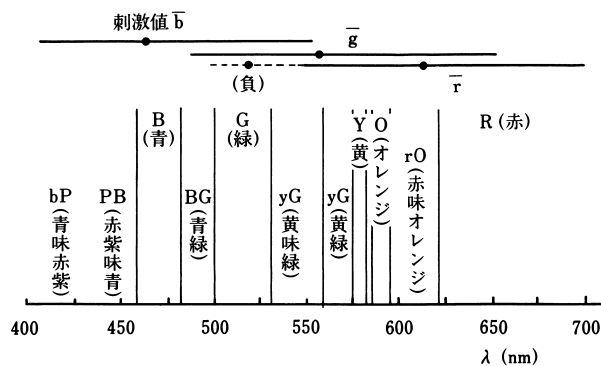


図4 光の波長

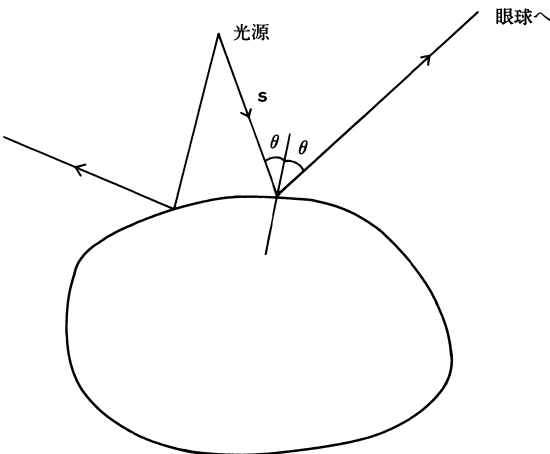


図5 レイトレーシング

3. 電磁波と幾何光学

光波の特性はマックスウェルによって、電界 \mathbf{E} 、磁界 \mathbf{H} として示されている。すなわち、時間因子が $\exp(j\omega t)$ のとき、 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ 、 $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ のとき、 ϵ 、 μ 、 σ を誘電率、透磁率、導電率とし、電束密度 \mathbf{D} 、磁界密度 \mathbf{B} 、電流 \mathbf{J} を用いて、^[7~9]

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

より、 $\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$ として、

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= j\omega \epsilon^* \mathbf{E} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega \mu \mathbf{H} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と示される。式(2)、(3)より、 $k = \omega \sqrt{\epsilon^* \mu}$ が十分大きいとき、 $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu}$ 、 ϵ_0 は真空中の誘電率として、

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \exp(-jk_0 L) \mathbf{e} \\ \mathbf{H} &= \exp(-jk_0 L) \mathbf{h} \end{aligned}$$

より、 n を屈折率として、

$$(\nabla L)^2 = n^2 = \epsilon / (\epsilon_0) \quad (4)$$

と与えられる。ここで

$$\mathbf{s}_0 = \nabla L / n \quad (5)$$

とすれば、 \mathbf{s}_0 は光線のベクトル方向である。 \mathbf{s}_0 はレイの方向を与えており、レイトレーシングは \mathbf{s}_0 の追跡をしたものである。レイトレーシングは、CG において、像形成を担っている。

4. 平面波の反射・屈折・透過

光波が平面境界に入射するとき、媒質 1、2 の媒質定数 ϵ_1^* 、 μ_1 、 σ_1 、 ϵ_2^* 、 μ_2 、 σ_2 を用いて、平面波の電界 \mathbf{E} が境界面と平行のとき、透過係数 T 、反射係数 R は、電界と磁界は、波の進行方向に対して、右ねじの関係を持ち、互いに垂直であることを用いて、入射角度 θ_1 (= 反射角度)、透過角度 θ_2 に対し、

$$\begin{aligned} T_E = \frac{E_2}{E_1} &= \frac{2\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \cos \theta_1}{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} \cos \theta_2} \\ R_E = \frac{E_3}{E_1} &= \frac{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} \cos \theta_2}{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} \cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} \cos \theta_2} \end{aligned} \quad (6)$$

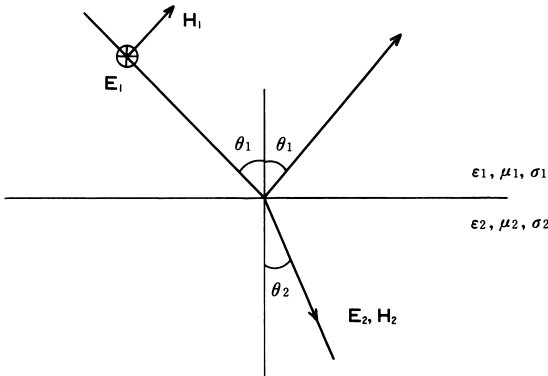


図 6 光波の反射・屈折、透過

また、磁界が境界面に垂直のとき、

$$\begin{aligned} T_H = \frac{H_2}{H_1} &= \frac{2\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \cos \theta_1}{\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \cos \theta_2} \\ R_H = \frac{H_3}{H_1} &= \frac{\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \cos \theta_1 - \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \cos \theta_2}{\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \cos \theta_1 + \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \cos \theta_2} \end{aligned} \quad (7)$$

導電率 σ_2 が十分大きい、金属の場合には、波は急激に減少し、たとえば、 Z 方向進行のとき、 E_x 、 H_y の成分は、

$$H_y = H_0 e^{-\xi z} \quad (8)$$

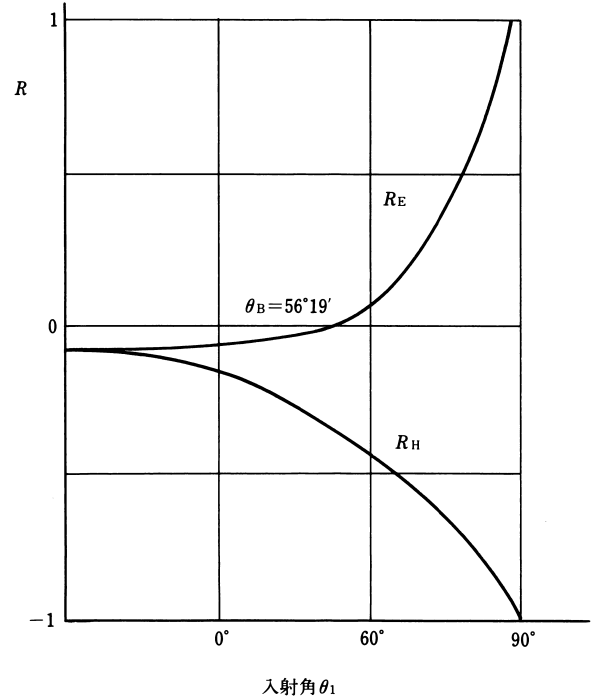


図 7 光波の反射(空気からガラスへの入射)
 $n=1$ $n=1.5$

ここに、 ξ は、

$$\xi = (1+j) \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (9)$$

となり、導体表面では、インピーダンスは、

$$\begin{aligned} Z_s &= \frac{E_x}{H_y} \\ &= (1+j) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

となり、波の振巾は、導電率 σ および、周波数 $\left(= \frac{\text{光速}}{\text{波長}} \right)$ に比例して急激に減少して小さくなる。

光の波動は波長によって異なっているが、金属、水晶、ガラスの例を図 7、8 に示す。

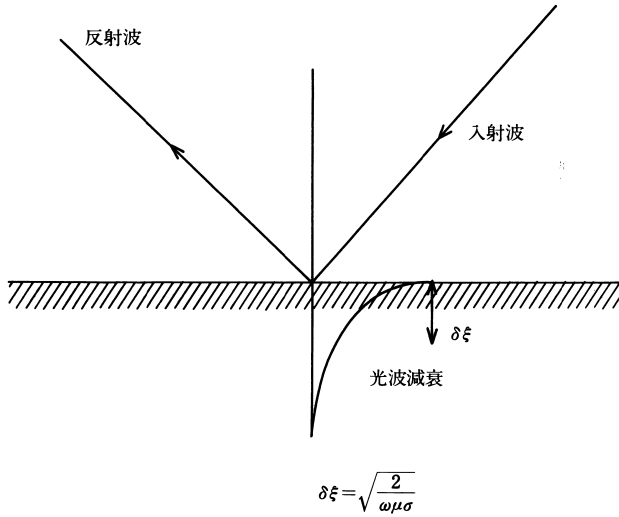


図8 金属表面上での光波反射

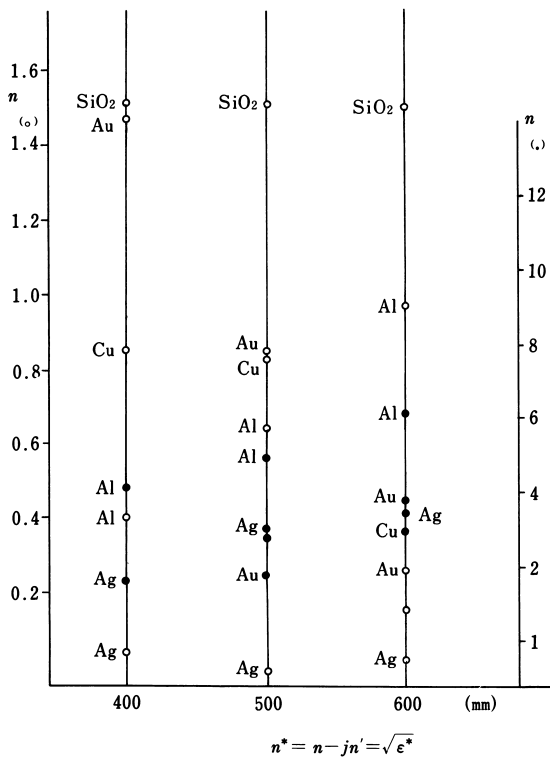


図9 物質の屈折率と吸収率

5. 光波の伝搬・回折

光波は、3次元の場合、表面 S_0 における界が

$$\mathbf{E} = i_{\tau} U(\mathbf{r}') \quad (11)$$

のとき、遠方における界 $\mathbf{E} = i_{\tau} U(\mathbf{r})$ は、 i_{τ} を偏波方向の単位ベクトルとして

$$U(\mathbf{r}) = \frac{jk}{4\pi} \int_{S_0} (1 + \cos\theta) U(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} dS' \quad (12)$$

ここに、 R は、表面と観測点での距離で

$$\mathbf{r}'' = \mathbf{r} - \mathbf{r}' \quad (13)$$

であり、表面の法線方向を \mathbf{n} としたとき、

$$\mathbf{n} \cdot \nabla R = \frac{\partial R}{\partial n} = -\cos\theta \quad (14)$$

である。式(12)において、光波は、放射点 Q より、 $e^{-jkR}/4\pi R$ の形状により、球面状に伝搬していくことを示している。^[7, 10]

同様に、2次元の場合には、光源が $q(\mathbf{r}')$ であるとき、

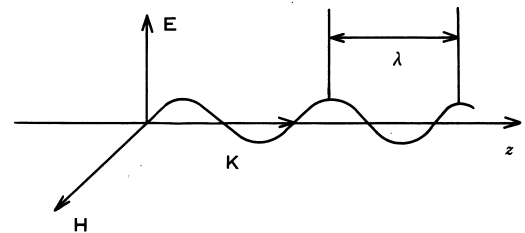
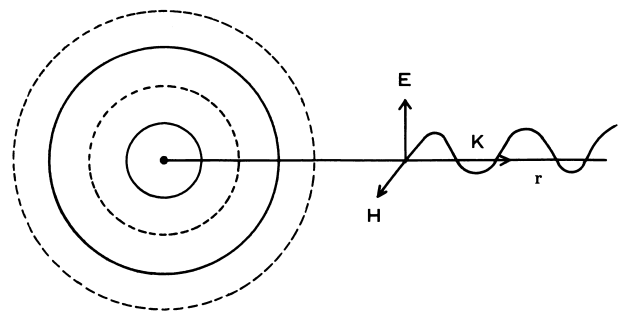
(a) 平面波 $\cos(\omega t - kz)$ (b) 球面波 $\frac{\cos(\omega t - kr)}{r}$

図10 平面波と球面波

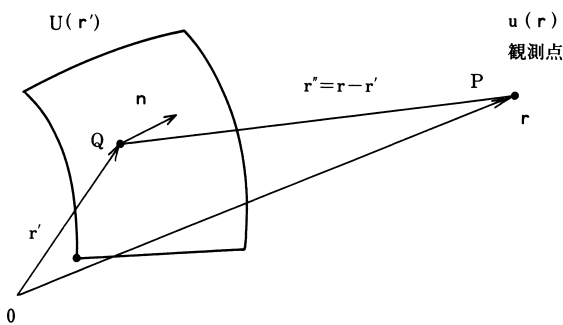


図11 光波の伝搬と回折

$$U(r) = \frac{1}{4j} \int q(r') H_0^{(2)}(R) ds' \quad (15)$$

ここに、 $R = |r''|$ として、

$$H_0^{(2)}(kR) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi kR}} e^{-jkR + j\frac{\pi}{4}} \quad (16)$$

で示され、波は円筒状に伝搬する。

図12は、2次元スリットの開口に一樣に照射された光波が回折する様子を示している。回折角 θ は、開口の大きさ $2a$ に逆比例し、波長に比例する。

$$\theta \cong \frac{\lambda}{2a} \quad (17)$$

有限の開口の光波回折は、部分的な開口の合成として考えればよい。もちろん、位相の干渉を考慮しなければならない。

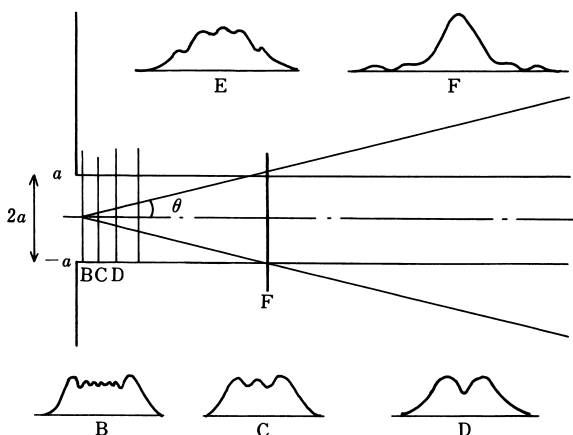


図12 開口面の回折

6. 凸形状による光波回折

物体の形状は、凸部、凹部、角部の合成として考えられる。凸部の代表例は球あるいは、円筒である。

凸形状の部分による反射は、図13(a)のように、接平面を xy 平面、法線を z 軸としたとき、反射方向は、入射方向を k として、

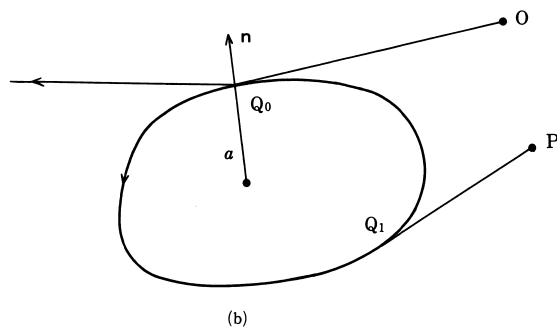
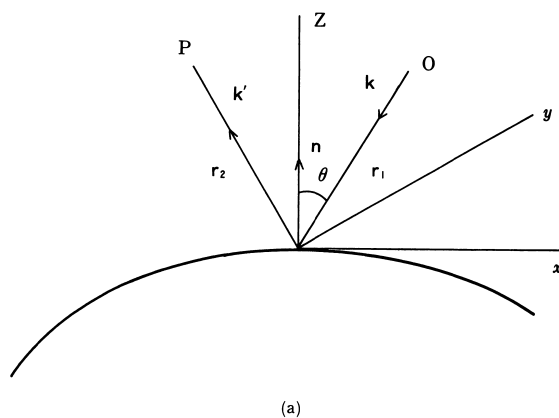


図13 凸面による光波反射回折とクリープ波

$$\begin{cases} k' = k - 2n(k \cdot n) \\ n \cdot r_1 = -r_1 \cos \theta \\ r_1 + r_2 = r \end{cases} \quad (18)$$

となり、入射界 E_0 、反射界 E_r は、全体として、電気双極子による入射波の場合

$$E \cong E_0 - \frac{1}{4\pi\epsilon} (\nabla \nabla + k^2) \left(p_0 - (n \cdot p_0) \frac{r}{r} \frac{e^{-jk|r|}}{|r|} \right) \quad (19)$$

ここに、 p_0 は入射波が電気双極子であることを示す。また、表面に沿って曲り込むクリープ波が存在し、その強度は、

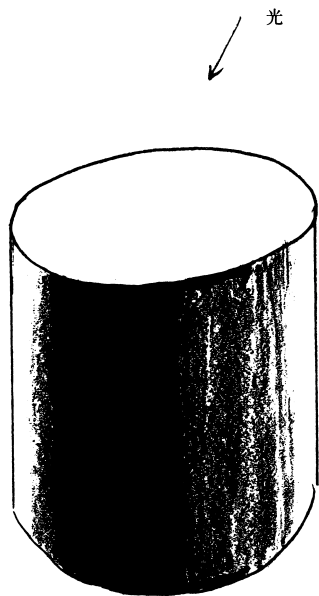


図14 凸面の光波回折とクリープ波

$$E_c = \sum_n a_n e^{-j2\pi \nu_n} \tag{20}$$

ここに、径の半径を a としたとき、 τ_n を係数として、
$$\nu_n = ka + \tau_n (ka)^{1/3} \tag{21}$$

となる。この波は、凸の明部と暗部の境界のなだらかな明暗の変化を与える。

図15は、立方体による光波の回折パターンと表面に誘起される電流である。立方体は完全導体としている。縁では、特異性により、大きな電流が流れる。⁽¹¹⁾

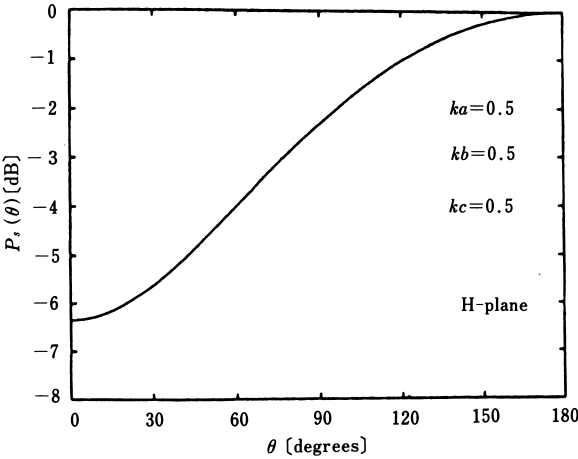


図15 立方体による光波の回折と誘導電流

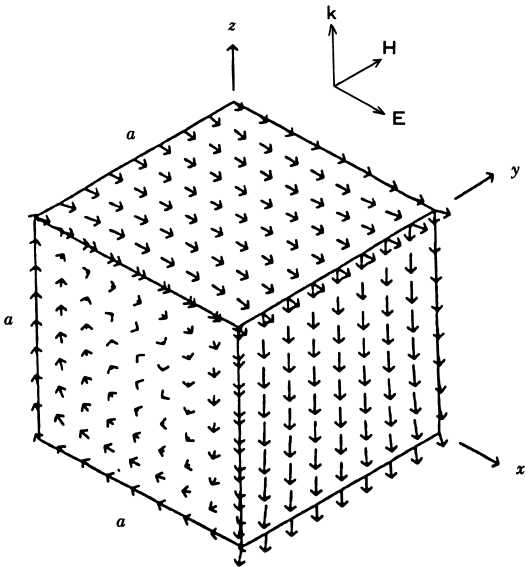
7. 縁による回折

鋭い縁においては、立方体の縁と同様、電界が縁に平行のとき強い電流が誘起される。自然では、偏波は、無偏光であるため、方向に関係なく、つねに、強い特異性が生じる。たとえば、くさび状の縁では、境界面に電界、磁界が平行な E、H 形偏波が、入射角 θ で入射する場合、

$$U_{EH} = e^{-jkr \cos(\theta - \theta_0)} \mp e^{-jkr \cos(\theta + \theta_0)} - e^{-jkr} \frac{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)}{2(2\pi - \alpha)} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{(jkr)^{1/2}} \left\{ \cot g_{(-)} + \cot h_{(-)} \pm \cot g_{(+)} \mp \cot h_{(+)} \right\} \tag{20}$$

ここに、
$$g_{(\mp)} = \frac{\pi(\theta_0' \mp \theta)}{2(2\pi - \alpha)}, \quad h_{(\mp)} = \frac{\pi(2\pi + (\theta \mp \theta_0'))}{2(2\pi - \alpha)} \tag{21}$$

図16の領域 I は、入射波と回折波の干渉が生じ、領域 II では、回折波のみである。図12は、 $\alpha = 0$ のときの 2 枚の縁による回折の例を示している。



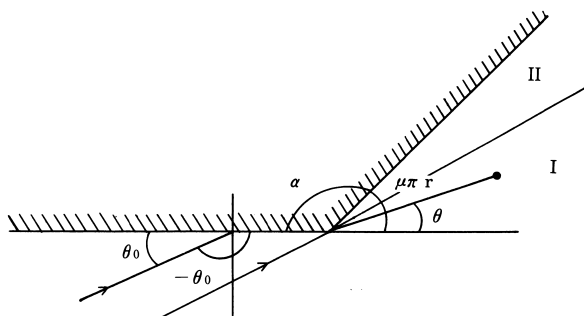


図16 くさび状縁の光波回折

8. 吸収と反射の色特性

4章～7章において、 k は、 $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$ であり、 ϵ が吸収をもつ $\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$ のとき、透過側、反射側ともに、吸収の影響を受ける。もし、 σ/ω の値(屈折率の n' 項)が波長存在性をもつとき、

$$\epsilon^*(\lambda) = \epsilon(\lambda) - j\epsilon'(\lambda) \quad (22)$$

$\epsilon' = \sigma'(\lambda)/\omega$ とおくことができる。このとき、 $\epsilon'(\lambda)$ は吸収を示す。自然の白色光のとき、入射波は、

$$U_0(r) = \int U_0(\lambda) e^{-jk(\lambda)r} d\lambda \quad (23)$$

と示すことができ、反射光は、表面インピーダンス

$$Z_s(\lambda) = (1 + j) \sqrt{\frac{\mu}{2\epsilon'(\lambda)}} \quad (24)$$

と示される。このとき、入射波を $U_0(r')$ とし、反射係数を、 $Z_0 = \mu_0/\epsilon_0$ とし、

$$R(\lambda) = \frac{Z_s(\lambda) - Z_0}{Z_s(\lambda) + Z_0} \quad (25)$$

とすれば、反射波は、式(25)より、

$$U(r) = \frac{jk_0}{4\pi} \int_s (1 + \cos\theta) R(\lambda) U(r) \frac{e^{-jk_s r''}}{|r''|} ds' \quad (26)$$

と示される。図17にその様子を示す。このとき、 Z_s は図9等のデータが用いられる。

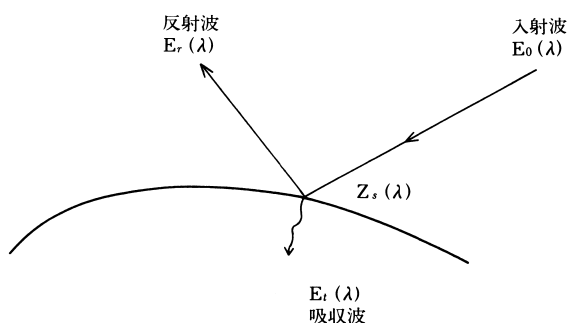


図17 表面反射と色

9. ランダム表面の反射

物体の表面は、完全に滑らかでないのが一般的である。とくに、波長 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ の可視光の波長にくらべ凹凸は、無視出来ない大きさで存在しているが多い。波長が、こうした凹凸のあるランダム表面に入射し、反射する場合、鋭くはなく、拡散を伴った、鈍い反射特性を持つ。⁽¹⁰⁾

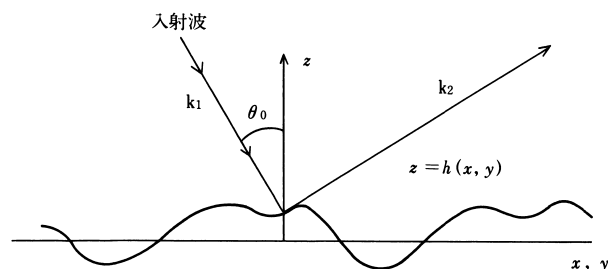


図18 ランダム平面と光波反射

ランダム平面が高さ

$$z = h(x, y) \quad (27)$$

このとき、式(27)より、散乱係数 r を、 $h = 0$ の平坦の鏡面反射の電界を E_{20} として、散乱界 E_2 について、

$$E_r = \frac{E_2}{E_{20}} \quad (28)$$

$k_s = k_2 - k_1$ とし、

$$E_r = K \iint e^{-jk_s \cdot r} ds$$

$$SK = \frac{1 + \cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\varphi_2}{\cos\theta_1 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad (29)$$

4 は k_2 の x 方向成分 $k_2 \sin\theta_2 \cos\varphi_2$ を与える角である。このとき、統計量の平均は、大きさを $2L$ として、2次元では、

$$\langle E_r \rangle = SK \frac{\sin k_s L}{\sin k_s L} \chi(k_z) \quad (30)$$

$$x(k_s) = \int p(h) e^{-jk_s \cdot h} dh$$

分散量 $V(E_r)$ は、 $p(h) = \frac{1}{6\sqrt{2}\pi} e^{-h^2/2\sigma^2}$ のとき、

$g = \sigma^2 k_z^2$ とし、自己相関関数 $c(r) = e^{-\left(\frac{r}{\ell}\right)^2}$ ならば、

$$\langle E_r \rangle \langle E_r^* \rangle = (SK)^2 \left(\frac{\sin k_s L}{k_s L} \right)^2 e^{-g} \quad (31)$$

$\langle E_r E_r^* \rangle = (SK)^2 e^{-g} F(k_x, g, \ell, L)$

であり、ここに、 F は、 k_x 、 g 、 ℓ 、 L の級数表示の関数

である。

$$\begin{aligned} V(E_r) &= \langle E_r E_r^* \rangle - \langle E_r \rangle \langle E_r^* \rangle \\ &= \frac{\ell (KS)^2}{Lk_z \sigma} \sqrt{\pi} e^{-\left(\frac{k_x^2 \ell^2}{4k_z \sigma^2} \right)} \end{aligned} \quad (32)$$

10. TDFD 法による解析

ランダム表面による光波の反射特性は、TDFD 法によって検討できる。この場合、式(2)は、差分方程式として、

$$\begin{aligned} H_x^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j+\frac{1}{2} \right) &= H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j+\frac{1}{2} \right) + C_1 \cdot \\ &\quad \{ E_y^n(i, j+1) - E_y^n(i, j) \} \\ H_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, j \right) &= H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, j \right) \\ &\quad + C_1 \{ E_x^n(i+1, j) - E_x^n(i, j) \} \\ E_y^n(i, j) &= C_2 E_y^{n-1}(i, j) - C_3 J^{n-\frac{1}{2}}(i, j) \\ &\quad + C_4 \left\{ H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j+\frac{1}{2} \right) - H_x^{n-\frac{1}{2}} \left(i, j-\frac{1}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. - H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i+\frac{1}{2}, j \right) + H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i-\frac{1}{2}, j \right) \right\} \end{aligned} \quad (33)$$

ここに、

$$C_1 = \frac{\Delta t}{\Delta s \mu(i, j)} \quad (4) \quad C_2 = \frac{1 - \frac{\Delta t \sigma(i, j)}{2 \epsilon(i, j)}}{1 + \frac{\Delta t \sigma(i, j)}{2 \epsilon(i, j)}} \quad (34)$$

$$C_3 = \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon(i, j)}}{1 + \frac{\Delta t \sigma(i, j)}{2 \epsilon(i, j)}} \quad (6) \quad C_4 = \frac{\frac{\Delta t}{\Delta s \mu(i, j)}}{1 + \frac{\Delta t \sigma(i, j)}{2 \epsilon(i, j)}}$$

入射波を

$$f(t, x, y) = \begin{cases} A \sin(\omega t - k_0 \cos \theta x - k_0 \sin \theta y) & 0 \leq t \leq 2T \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (35)$$

として、 $y=0$ から入射するものとして、計算した結果を図19に示す。ただし、 $\theta = \frac{l}{2h}$ 、 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 、 $k = 2\pi/\lambda$ である。入射波は、 $\theta = 0$ 、 $T = 2\text{nsec}$ 、 $\lambda = 60\text{cm}$ である。

表面の凹凸の大きさ最大値 δm 、相関長 l について、数値計算を行なった。 δm が大きく、 l が波長より短いときには、散乱は平均化する、 l が波長と同程度のときには、

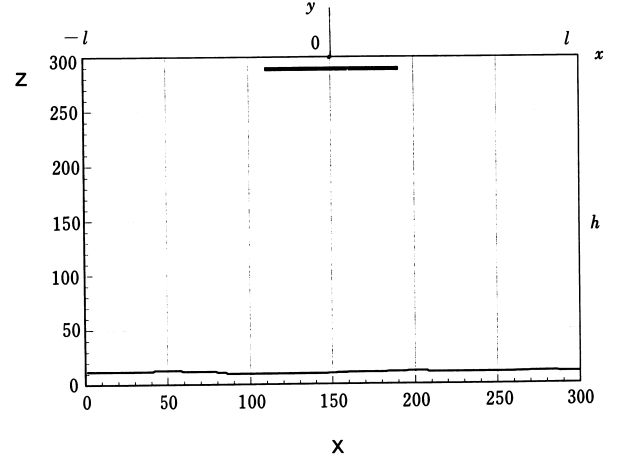


図19 (a) ランダム表面による光波反射 $\delta m/\lambda=0.1$ 、 $l/\lambda=1.0$ (ケース I)

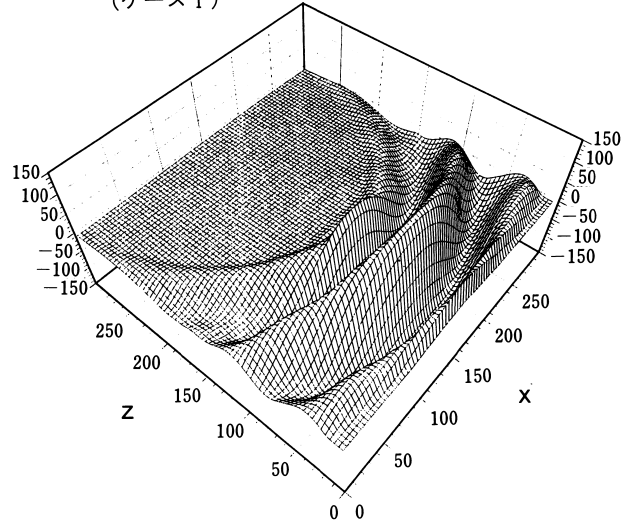


図19 (b) $t=10\text{ns}$ (ケース I)

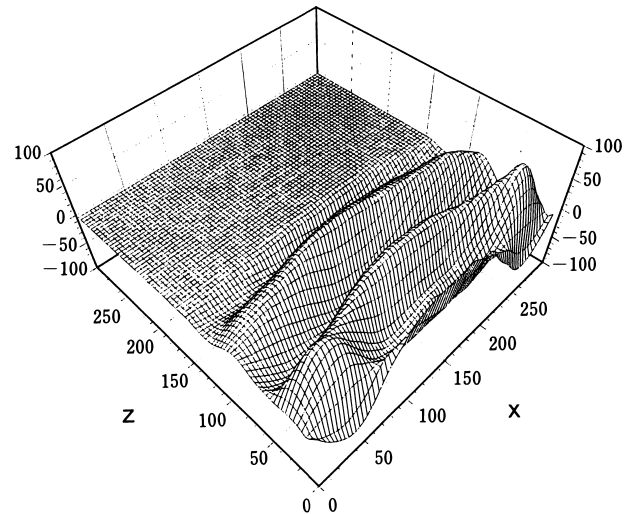


図19 (c) $t=14\text{ns}$ (ケース I)

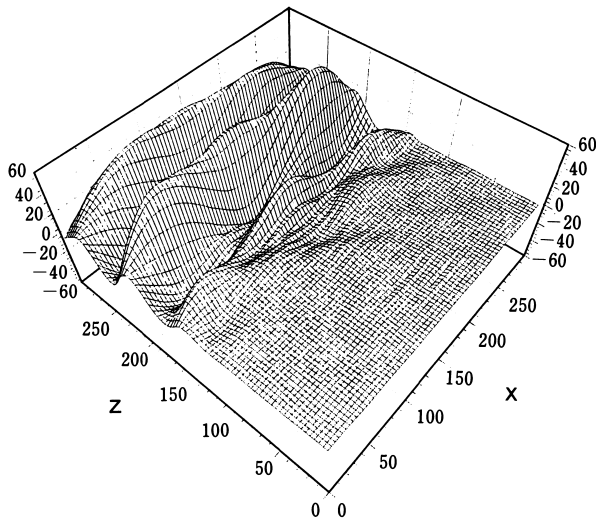


図19 (d) $t = 20ns$ (ケース I)

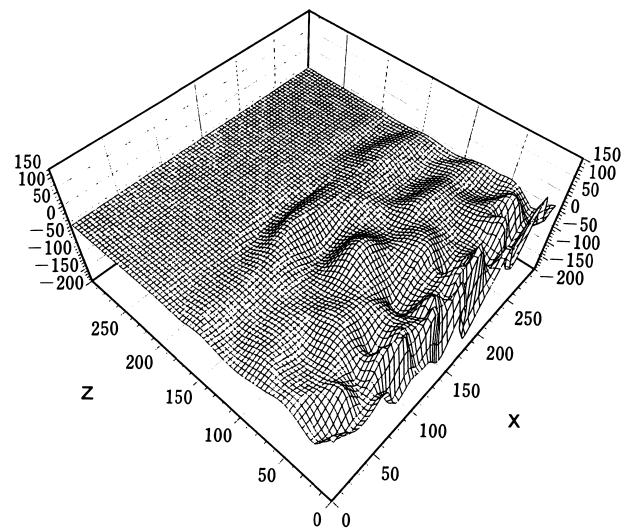


図19 (g) $t = 14ns$ (ケース II)

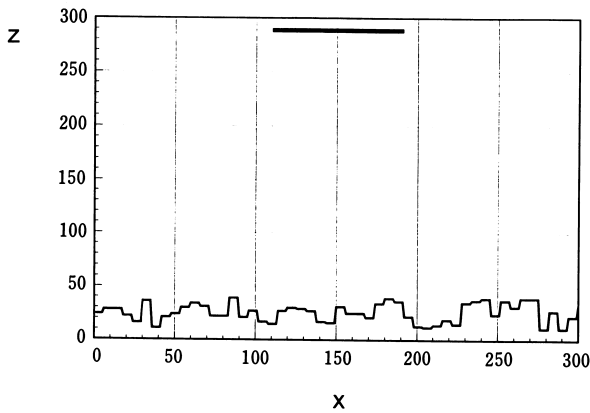


図19 (e) $\delta_m/\lambda = 1.0$, $l/\lambda = 0.1$ (ケース II)

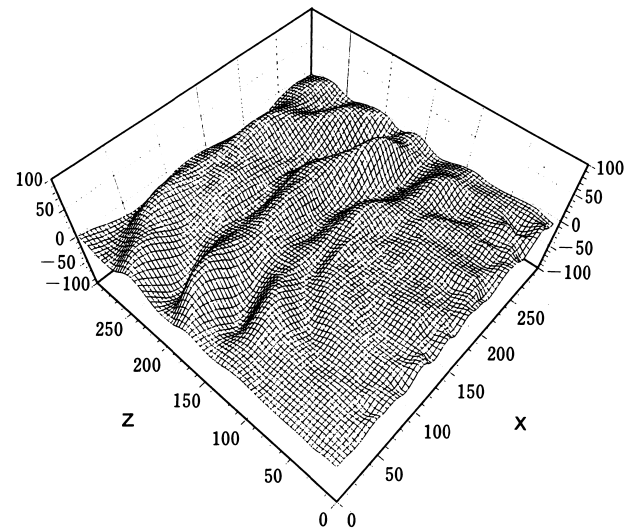


図19 (h) $t = 20ns$ (ケース II)

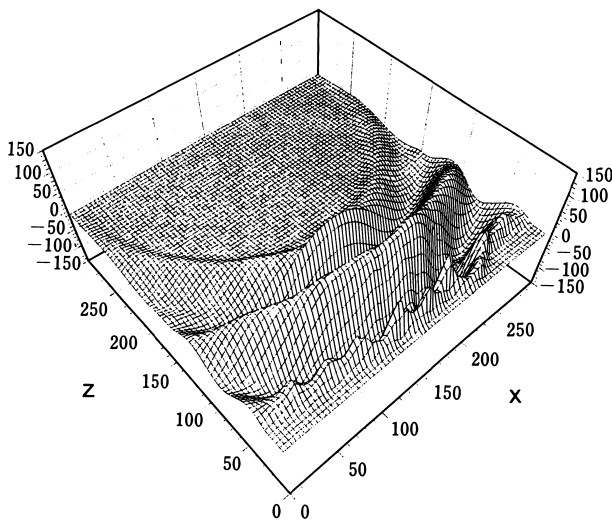


図19 (f) $t = 10ns$ (ケース II)

複雑な反射を示すことがしられる。これらの特性により
現実の物体による反射波の特性がしられる。

11. まとめ

CG、VRあるいは造形芸術における根本的特性である光波の、反射について、分光特性、形状特性、ランダム表面についての基本性質について論じた。これらの結果をもとに、詳細な展開をすることにより、さらに有益な造形情報の結果が導かれると思われる。

参考文献

- 〔1〕 科学技術長編：“光と情報” 大蔵省出版局(1987)
- 〔2〕 宮崎保光：“画像を中心としたマルチメディアキャンパスネットワークの構成に関する考察”、名古屋造形芸術大学研究紀要、第2号、pp75-90(1996)
- 〔3〕 宮崎保光：“コンピュータを用いた光波・電磁波計算解析の動向”、信学技報 MW95-41、OPE95-24(1995)
- 〔4〕 高橋港一、宮崎保光：“ランダム表面を考慮した地中レーダ応答波形のウェーブレット解析”、信学技報 EMCJ96-61(1996)
- 〔5〕 岩田一明監修：“CAD 概論” 共立出版(1995)
- 〔6〕 樋渡涓二：“視覚とテレビジョン”、日本放送出版協会(1968)
- 〔7〕 D.S. Jones：“The Theory of Electromagnetism” Pergamon Press (1964)
- 〔8〕 宇田川銑久、宮崎保光：“だ円筒導体による平面波の回折の等角写像による考察”、信学誌、第48巻7号、頁1222-1231(1965)
- 〔9〕 宇田川銑久、宮崎保光：“円錐形開きをもつ円形導波路における反射と姿態変換”、信学誌、第49巻12号、頁2407-2414(1966)
- 〔10〕 J.O. Ogilry：“Theory of Wave Scattering From Random Rough Surface ” Inst-of Phys. Pub. Bristol and Philadelphia (1991)
- 〔11〕 真鍋克也、宮崎保光：“ベクトル境界要素法を用いた完全導体性直方体による電磁波散乱の解析”、電気学会論文誌、第116-C 巻、第1号、頁22-26(1996)