Graphics with Processing

2017-10 照明と材質のモデル

http://vilab.org

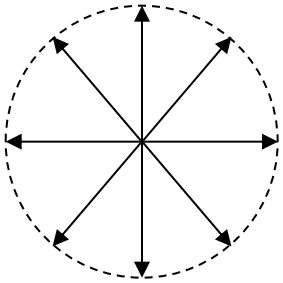
塩澤秀和

10.1* レンダリングと光源

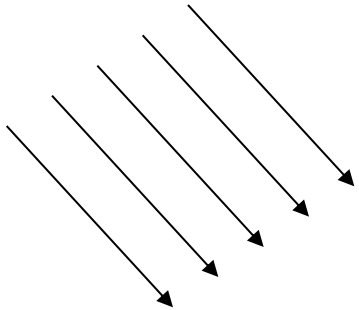
レンダリング（p.122）

- 座標変換後の画像生成
  - 3次元シーン → 2次元画像
  - 色，陰影，質感などの表現
  - 光学現象のシミュレーション
  - 高品質 vs リアルタイム
- レンダリング関連技術
  - 隠面消去
  - ライティングとシェーディング
  - マッピング（テクスチャ・法線等）
  - 影付け，など…
- 高品質CGのレンダリング
  - レイトレーシング
  - 大域照明
  - ボリュームレンダリング，など…

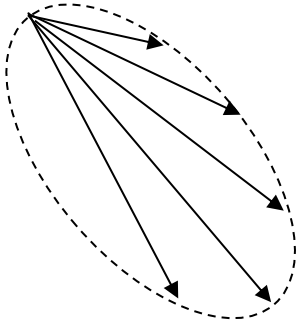
光源の種類（p.144）



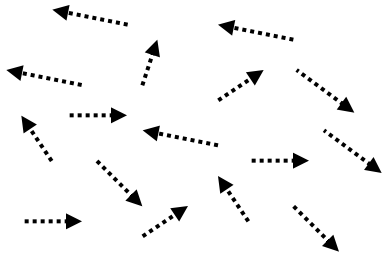
点光源
（電球など）



方向光
（太陽光など）



スポットライト

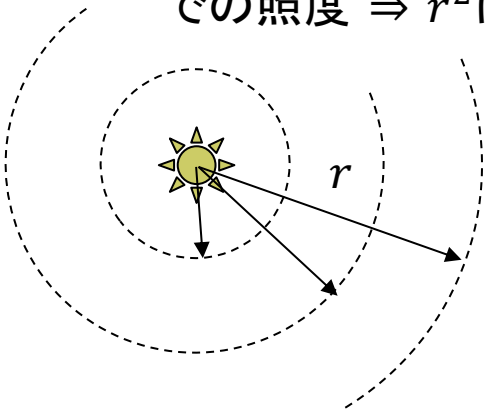


環境光（壁などに
何回も反射した
間接光のモデル化）

10.2* 照明の効果

光源からの照明

- 照明の色
  - 太陽光・蛍光灯 ⇒ 白
  - 白熱電球 ⇒ 白っぽいオレンジ
- 照明の明るさ
  - 光束＝光源から発する光の量（単位ルーメン lm）
  - 照度＝単位面積あたりに当たる光の量（単位ルクス lx）
  - 点光源から距離 r 離れた場所での照度 ⇒ r^2に反比例



光源を中心とする球の表面積は
$S = 4\pi r^2$

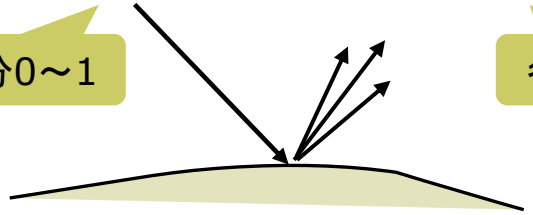
反射と色の関係

入射光
$L = (L_R, L_G, L_B)$

反射光
$I = (I_R, I_G, I_B)$

各成分0～1

各成分0～1



表面色（反射率）
$k = (k_R, k_G, k_B)$

物体の色＝白色光の反射率（各成分0～1）

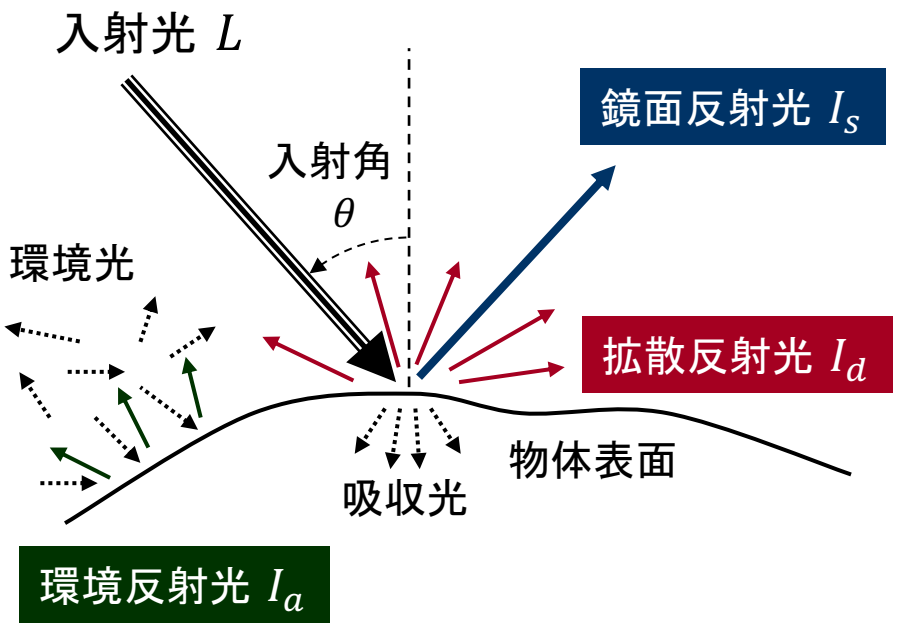
- 反射光＝表面色×入射光
  - 色の見え方は照明にも影響される
  - 光のスペクトル（RGB）ごとに計算

⇒ ベクトルの「要素ごとの積」

$$(I_R, I_G, I_B) = (k_R L_R, k_G L_G, k_B L_B)$$

10.3* 反射光のモデル

反射光のモデル（p.141）



- 観測される色
  - 各反射光（＋放射光）の総和

$$I = I_d + I_s + I_a + I_e$$

※ それぞれにRGB成分があることに注意

反射光の種類

- 拡散反射光（I_d：diffuse）
  - 物体表層で複雑に反射・透過・屈折することで拡散した光
  - 光の入射角に依存 ⇒ 立体感
- 鏡面反射光（I_s：specular）
  - 物体表面に並んだ分子で鏡のようにきれいに反射した光
  - 見る角度に依存 ⇒ “光沢”
- 環境反射光（I_a：ambient）
  - 特定の光源ではなく，空間全体の間接光に対する反射光
  - シーン全体が一様に照らされる
- 放射光（I_e：emissive）
  - 物体自体からの発光
  - 周囲に関係なく一定の明るさ

10.4* 材質属性のモデル

材質（マテリアル）属性

- “色”の設定
  - 反射・吸収される光の波長は，物体表面の材質によって違う
  - 白色光に対する反射スペクトル（分光分布）で材質をモデル化
- 拡散反射色（k_d）
  - 拡散反射の反射率（RGB）
  - 表面が粗いほど，特定の波長が吸収され，残りの光が拡散する
  - 通常の意味での物体の色
- 鏡面反射色（k_s）
  - 鏡面反射の反射率（RGB）
  - 表面が滑らかだと，すぐに反射して着色の少ない光が増える
  - 金属光沢，ハイライト，つや
- 環境反射色（k_a）
  - 環境光に対する反射率（RGB）
  - 通常は拡散反射色と同じ色
- 放射光（k_e）
  - 電球などの発光スペクトル（RGB）
  - 周囲に関係なく一定の色になる

$$I_e = k_e \quad \text{（常に一定の色）}$$

材質による特徴

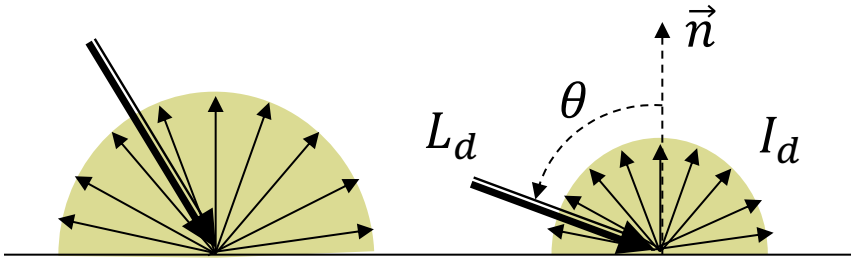
- 紙・木など
  - 鏡面反射（光沢）がほとんどない
- プラスチックなど
  - 若干の鏡面反射によるつやがある
- 金属など
  - 強く白っぽい鏡面反射（$k_s \neq k_d$）

10.5* 反射光の計算モデル

拡散反射光（p.144）

- ランベルト（Lambert）の余弦則
  - 光がどの方向から入射しても，全方向に均等に拡散する場合
  - 入射角余弦の法則より，表面の明るさは入射角のcosに比例

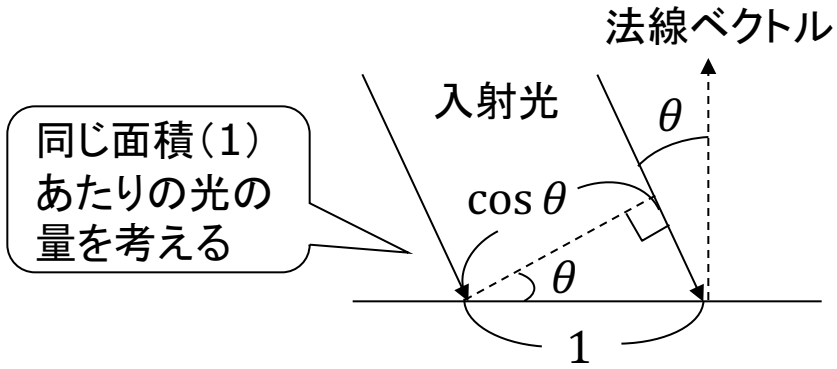
$$I_d = k_d L_d \cos\theta$$



上から照らされると明るくなる　　横から照らされると暗くなる

L_d：入射光（拡散光用成分）　I_d：反射光
k_d：物体表面の拡散反射率　θ：入射角

- 入射角余弦の法則
  - 単位面積あたりに当たる入射光の量は入射角のcosに比例



環境反射光（p.144）

- 環境光による拡散反射光
  - 環境光（L_a）は，四方八方から均等に当たるので方向がない
  - どこからでも同じ色に見える

$$I_a = k_a L_a$$ （k_a：環境光の反射率）

10.6 照明と材質の関数

基本的な光源

- pointLight(r, g, b, x, y, z)
  - 点光源（例：電球）
  - r, g, b：光の色（HSBモードの場合は，色相，彩度，明度）
  - x, y, z：光源の座標
- directionalLight(r, g, b, nx, ny, nz)
  - 方向光（例：太陽光，天井照明）
  - nx, ny, nz：光の方向ベクトル
- ambientLight(r, g, b)
  - 環境光（間接光のモデル化）
  - 全方向から均等にあたる光
- サンプル
  - 3D (Basics) → Lights
  - **物体をおく前に，光源をおくこと**

標準の光源

- lights()
  - 下記の光源を設定
  - ambientLight(128, 128, 128)
  - directionalLight(128, 128, 128, 0, 0, -1)

基本的な材質特性

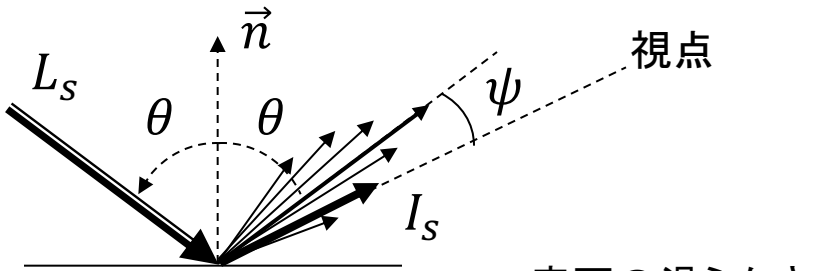
- fill(色)
  - 通常の色＝拡散反射率（k_d）
- ambient(色)
  - 環境反射率（k_a）の設定
  - 無指定時にはfillと同じ色で計算
- emissive(色)
  - 放射光（k_e）の設定（蛍光面）

10.7* 光沢の表現

鏡面反射光（p.148）

- フォン（Phong）の反射モデル
  - 光がごく表層でほぼ完全に反射
    ⇒ 反射光が正反射方向に集中
  - 従来，フォンのモデルで近似

$$I_s = k_s L_s \cos^{\alpha} \psi$$



α ： 表面の滑らかさ
k_s： 鏡面反射率

- より正確なモデル（p.149）
  - ブリンの反射モデル
  - クック･トランスの反射モデル

鏡面反射の材質特性

- specular(色)
  - 鏡面反射率（k_s）
- shininess(輝き)
  - 鏡面反射光の集中度（α）
  - 輝き： 10～50～500（金属）

光源のパラメータ

- lightSpecular(r, g, b)
  - 後に設置する光源に鏡面反射光用の成分（L_s）を追加
  - 通常は光源と同じ色でよい
- lightFallOff(c1, c2, c3)
  - 光の減衰のしかたを変更する
  - 距離dとして $\dfrac{1}{c_1 + c_2 d + c_3 d^2}$

10.8 照明と材質の設定例

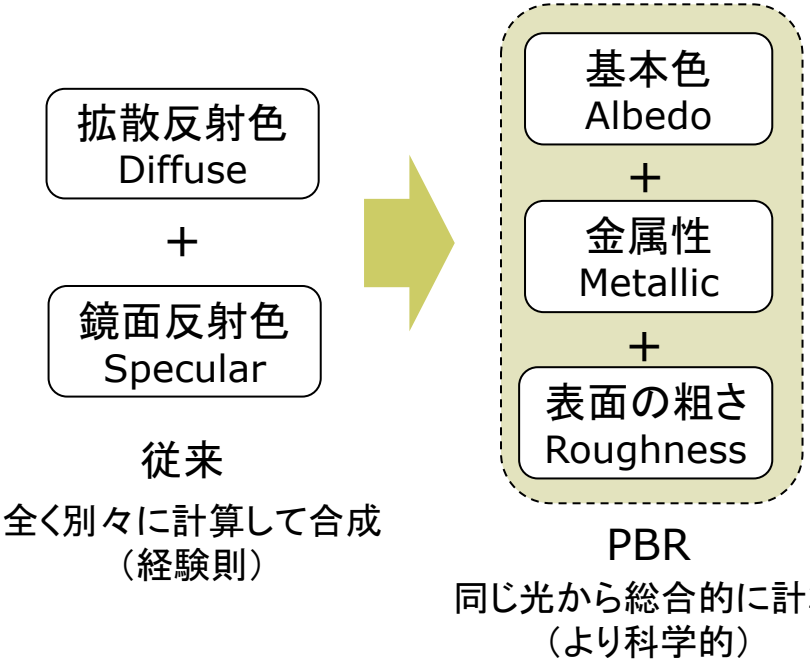
```
void draw() {
  float a = radians(frameCount);
  background(0);
  perspective();
  camera(0, -100, 200, 0,0,0, 0,1,0);
  ambientLight(50, 50, 50);  // 環境光

  // 回転する点光源
  float lx = 100 * cos(a);
  float ly = lx - 120;
  float lz = 100 * sin(a);
  // ボタンを押すと鏡面反射成分を除く
  if (!mousePressed)
      lightSpecular(128, 128, 128);
  pointLight(128, 128, 128, lx, ly, lz);

  stroke(128);
  line(lx, 0, lz, lx, ly, lz);
  noStroke();
  rotateY(a / 8);
  pushMatrix();
    translate(-40, -20, 0);
    fill(0, 255, 0);  specular(0);
    sphere(20);  // 鏡面反射のない球
    translate(80, 0, 0);
    specular(100, 100, 100);  // 鏡面反射色
    shininess(200 * mouseX / width);
    sphere(20);  // 鏡面反射のある球
  popMatrix();

  fill(0, 0, 255);  // 鏡面反射色はついたまま
  beginShape(TRIANGLES);
  for (int x = -100; x <= 100; x += 10) {
    for (int z = -100; z <= 100; z += 10) {
      vertex(x, 0, z); vertex(x + 10, 0, z);
      vertex(x + 10, 0, z + 10);
    }
  }
  endShape();
}
```

10.9* 物理ベースレンダリング（PBR）

Physically based rendering

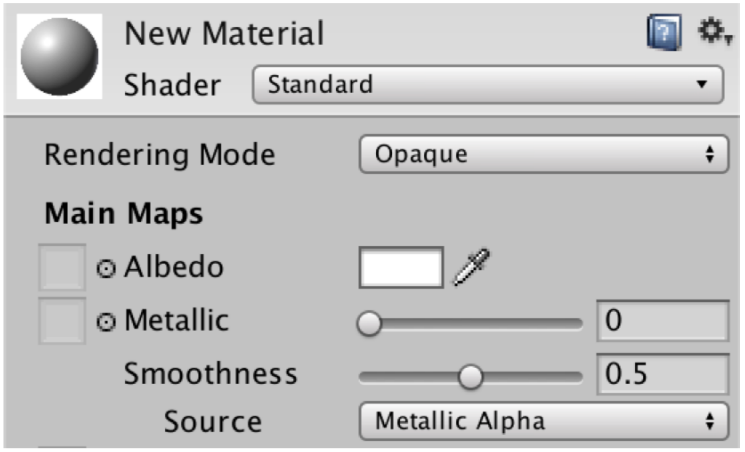
- 光学現象をより忠実に再現
  - 厳密な定義はない言葉？
  - 最近ゲームなどで急速に採用

- 物理ベースの材質モデル



- 材質のマッピング
  - テクスチャマッピング（次回）
    表面に模様画像を貼り付ける
    （基本色の分布のマッピング）
  - 物理パラメータのマッピング
    金属性や粗さの分布を貼り付ける
  - その他，透過や法線（微細な凹凸）

- 例：Unityの材質設定（一部）



10.10 演習課題

課題

問1) ピンク色の紙に斜め45度から青白い光を照らすとどのような色に見えるか，拡散反射光のRGB値を計算して考察せよ

- 色のRGB値は適当に設定せよ

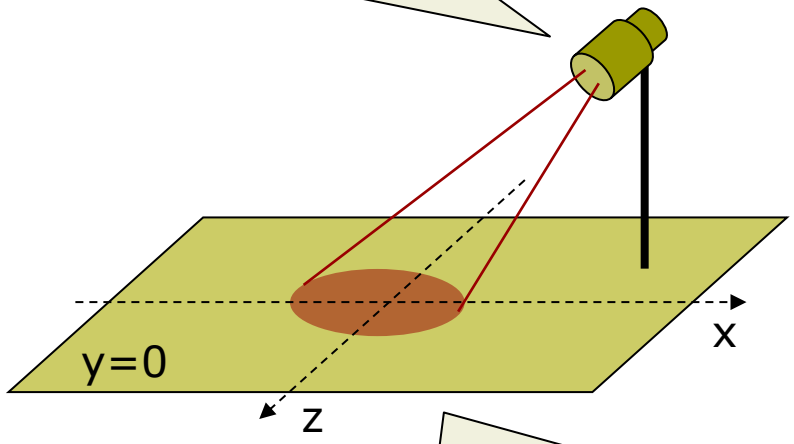
問2) スポットライト（下記）を使用したシーンを工夫して作成せよ

- 床など広い面は，タイルを敷き詰めるようにする（理由は次回）
- 環境光も少し照らすとよい

スポットライト関数

- spotLight(r, g, b, x, y, z, nx, ny, nz, 角度, 集中度)
  - 角度：光の範囲（～π/2程度）
  - 集中度：1～100～それ以上

```
// スポットライトの設置例
spotLight(255, 0, 0, 50, -50, -50,
-1, 1, 1, PI/2, 100)
```

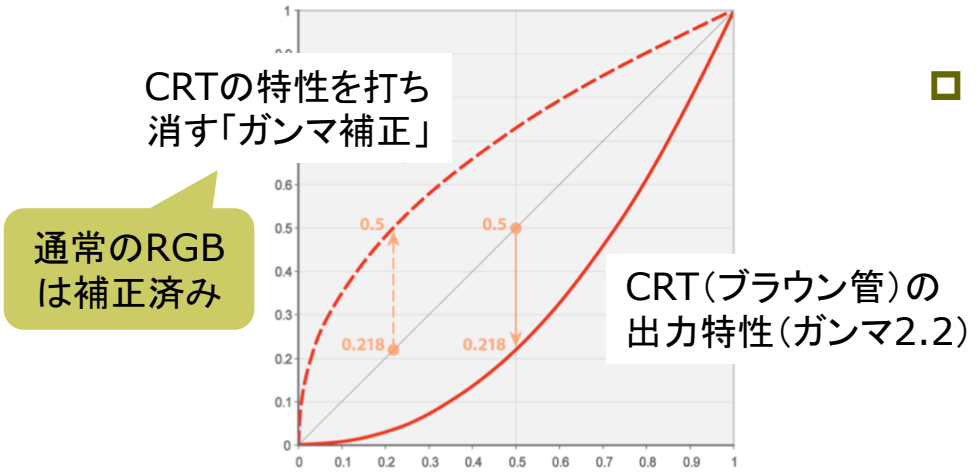



```
// 床の描画例
noStroke();
beginShape(QUADS);
for (x = -100; x < 100; x += 10) {
   for (z = -100; z < 100; z += 10) {
      vertex(x, 0, z);
      vertex(x, 0, z + 10);
      vertex(x + 10, 0, z + 10);
      vertex(x + 10, 0, z);
   }
}
endShape();
```

10.11 参考：PBRの使用技術

主な使用技術

- リニア（線形）色空間の利用
  - 標準規格のRGBの値は，CRT（ブラウン管）の特性に由来する階調補正（ガンマ補正）がかけられている ⇒ 暗い色が増強
  - 逆補正によって，光の物理的なエネルギー量に比例した値で計算し，表示時に再補正する

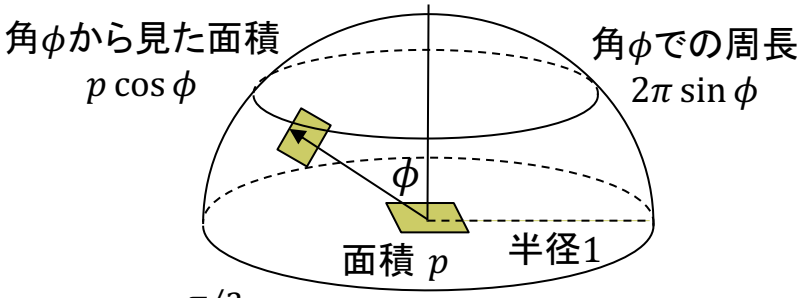


- HDRレンダリング
  - HDR=High Dynamic Range
  - 人間の広範囲な輝度の知覚に対応するため，RGB値に実数（16ビット0～10^{12}）を採用
  - 薄明かりで細やかな描写
  - 高輝度領域を抽出し，明るい光がにじむような処理も（ブルーム/グレア/グロー/光芒/閃光）
- IBL：光源画像による照明
  - IBL=Image Based Lighting
  - 空，景色，窓などの実写画像に基づいて照明効果を計算
    ⇒ 金属等への映り込みの表現
  - 画像から光源の位置等を推定

10.12 参考：PBRの使用技術

- 光エネルギー保存則
  - 任意の点で単位面積当たり
    反射光の総量 ≦ 入射光の総量
  - 例：拡散反射率の正規化

表面の面積 p を，それを覆う半球を通して
見た面積を（全方向からの分）合計すると



$$\int_0^{\pi/2} p\cos\phi\cdot 2\pi\sin\phi\,d\phi = \pi p$$

反射光はπ倍の面積に広がるのと同等なので，
ある点に届く反射光は，最大でも入射光の$1/\pi$

πで割って正規化 ⇒ $I_d = \dfrac{k_d}{\pi} L\cos\theta$

- BRDF（双方向反射率分布関数）
  - ある方向から来た光が，ある点で，
    ある方向に反射する割合を表す
  - 保存則を考慮した反射率の一般化

mは「金属性」

簡単なBRDF
＝$(1-m)$×拡散反射率＋m×鏡面反射率

- 高度な鏡面反射モデル
  - クック・トランスのモデルなど

鏡面反射率 $R_s = \dfrac{F}{\pi}\dfrac{DG}{(\vec{n}\cdot\vec{L})(\vec{n}\cdot\vec{V})}$

F：フレネル項　D：微小面分布関数　G：幾何減衰係数
$\vec{n}$：法線ベクトル　$\vec{L},\vec{V}$：光源および視点へのベクトル

  - フレネル反射：水平に近い入射光
    に対して反射率が高くなる現象
  - 「表面の粗さ」の影響もモデル化