



**Imagine Day 2009**

# 本当のHDR表現へ

～ アーティストにも知ってほしいリフレクタンスの基礎 ～

Beyond a glare effect for HDR Rendering - Basic of Reflectance

株式会社トライエース 研究開発部 五反田義治

- リフレクタンスの基礎について
  - GIもいいけど足元を固める
    - Interreflectionがいい雰囲気や空気感を出しても
      - オブジェクトはみんなプラスチック?
  - 頑張っって美しいテクスチャを描いても...
    - どれもこれもプラスチックな質感?
    - 目指す質感設定を勘などに頼って時間の浪費?
  - 効率と品質を両立しましょう!

- HDRといえはグレア?

- 実際の映像ではよほど強い光でないと  
大きいグレアはでない

Research and Development Department



実写のHDR画像



物理的正確性に乏しいグレアの例

明るさ(255で正規化)

## グレア量のグラフ



Pixel数

35mmフィルム, 横幅1280pixel, 波長450nm, F2.8, 円形絞り

- なぜグレアのスレッシュホールドをさげるのか？
  - 正しい質感設定がされていないため？
    - スペキュラーなどの強さがエネルギー的に正しくない
      - 結果的にレンダリング画像のダイナミックレンジ(DR)が本来のDRに比べて充分でない
        - » ≠HDR
      - スレッシュホールドを下げてグレアを出そうとしてしまう
        - » Diffuseの部分にもグレアが出る不自然な映像
    - 絵作りの方向性でわざとそうしている場合もある



- 美しくないブラー

- 物理的に正しいフォーカスブラーなどを実装しても

- レンダリング画像が正しいダイナミックレンジを持っていないとききれいなボケが表現されない

Research and Development Department



正しいダイナミックレンジを持っている画像の例

# 本当のHDRとは?



- ポストエフェクトでフィルタをかけるのではなく
  - 画像のダイナミックレンジが高いということ
    - 正しい質感設定とレンダリングパイプラインがあれば
      - リアリティのあるブラーやグレア
      - リアリティのある質感とHDR感

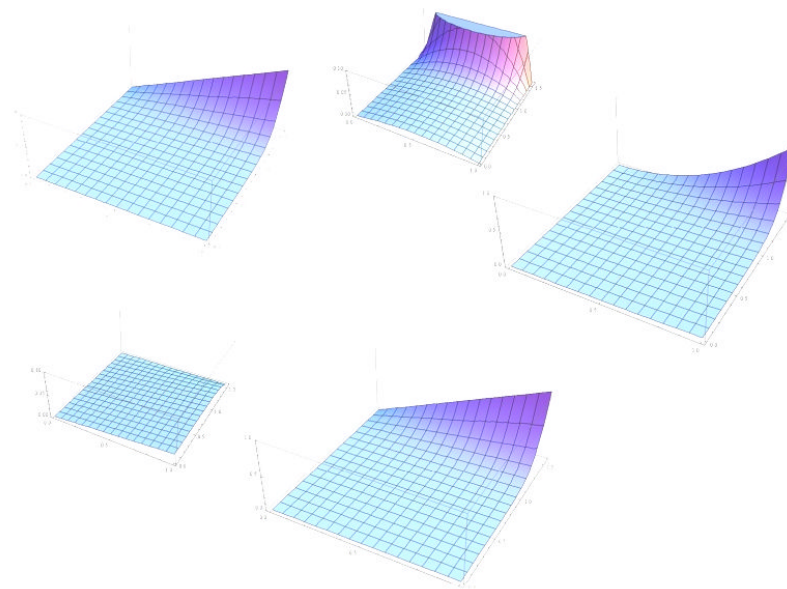


Research and Development Department



- 光が眼に届くことによって「視えている」という現象を再現すること
  - － 光源から眼へ
  - － 光源から何かの物質に当たって反射や散乱などして眼へ
    - このセッションではほとんどの物質を見るときに起こる「反射」という現象を取り扱います

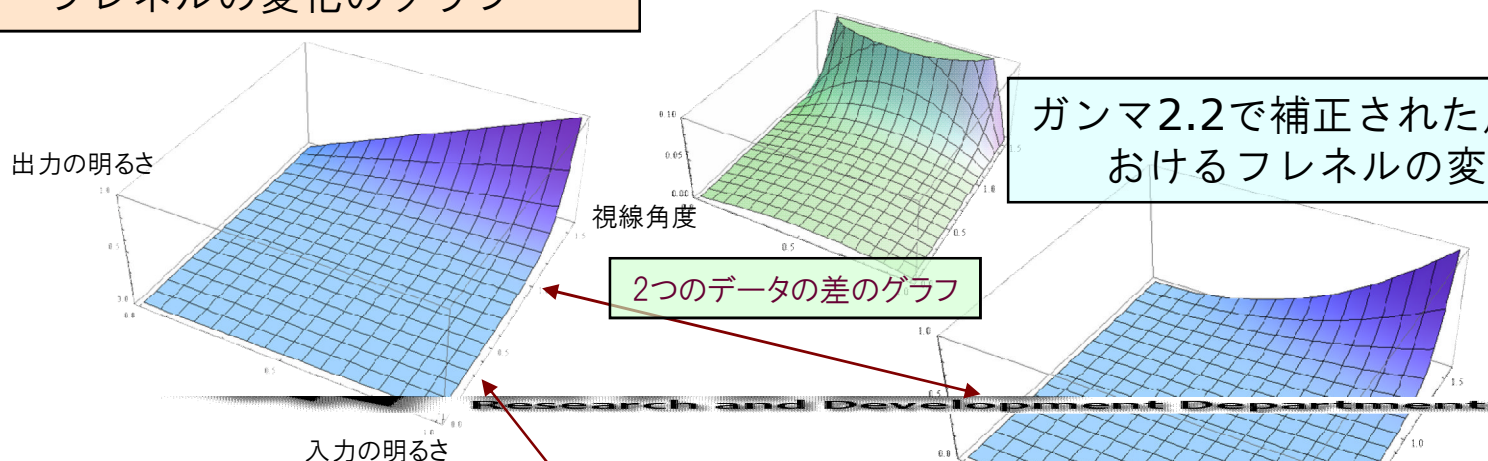
- リニア空間でレンダリングする
  - せっかく正しいレンダリングで微妙な反射特性などを再現できても
    - ガンマ補正された色空間でレンダリングしてしまったらその差よりも色空間による差のほうが大きい!



# リニア空間とガンマ補正



リニア空間で屈折率1.333における  
フレネルの変化のグラフ



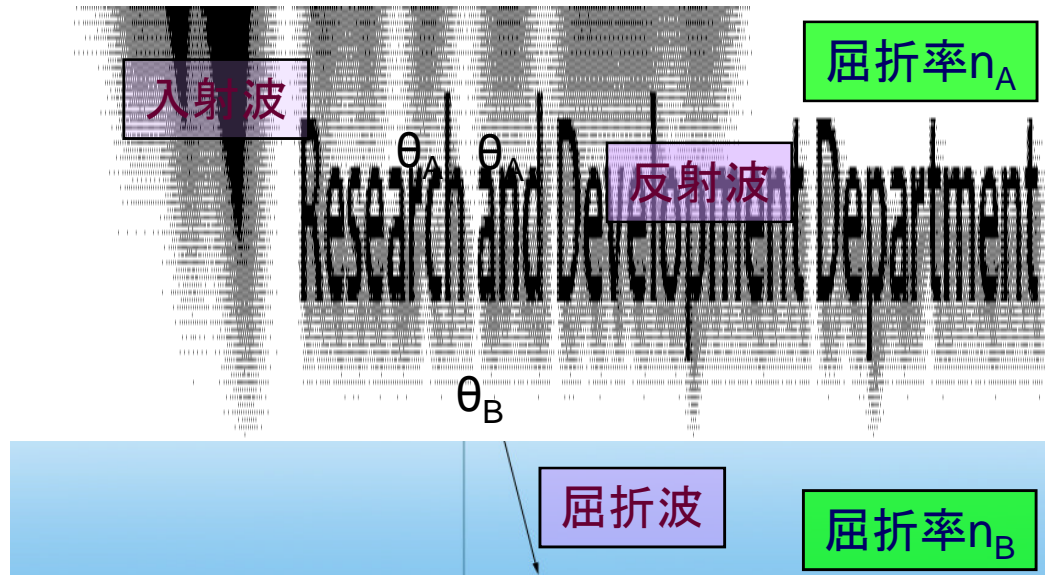
2つのデータの差のグラフ

2つのデータの差のグラフ

ガンマ2.2で補正された屈折率1.333に  
おけるフレネルの変化のグラフ

リニア空間で屈折率1.5における  
フレネルの変化のグラフ

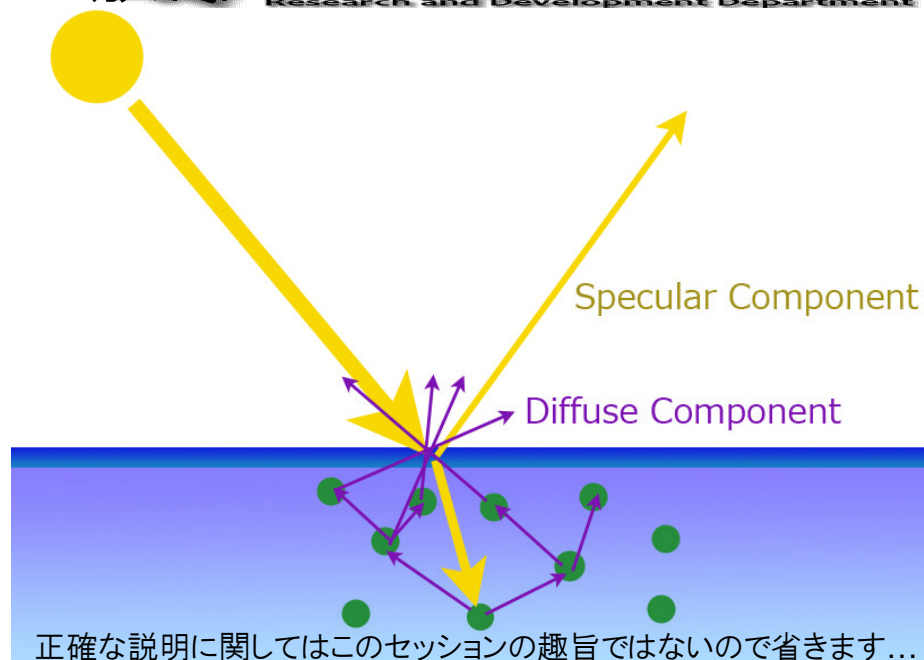
# スネル(屈折)の法則



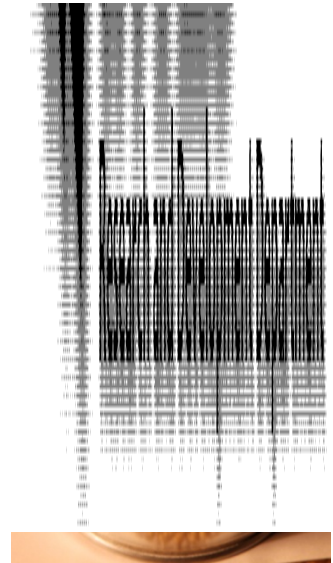
$$\frac{\sin\theta_A}{\sin\theta_B} = \frac{n_A}{n_B}$$

波が屈折率の異なる2種類の媒質の境界面を通過するとき  
その境界面となす角度(sin)の比が屈折率の比と等しくなるという法則

- 大雑把に言えば
  - スペキュラーとは物質の表面で反射された光
    - = 反射
  - ディフューズとは物質の表面で反射しなかった光が物質内に透過してから放出されたもの
    - = 屈折



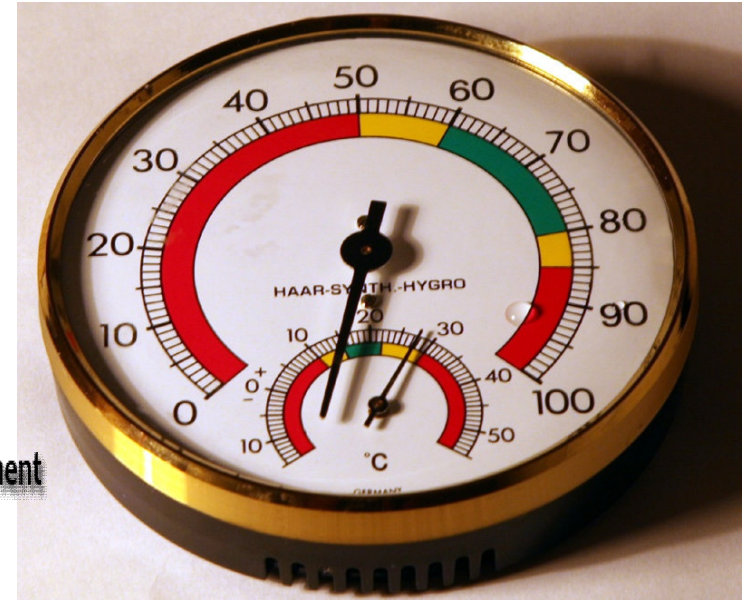
- スペキュラー(鏡面反射)の特徴
  - 反射の色は光源の色
    - 厳密には異なる
  - 金属などでスペキュラー反射光に色が付くものがある(選択反射)
    - 実際にはスペキュラーで単純に特定の波長の光が吸収されるわけではない
  - ミクロなレベルでの分子形状(配列)を反映して反射した光が拡散する(光沢,glossy)
    - 反射の指向性
    - 光を特定の方向に集中して反射する



# スペキュラーの例



Research and Development Department

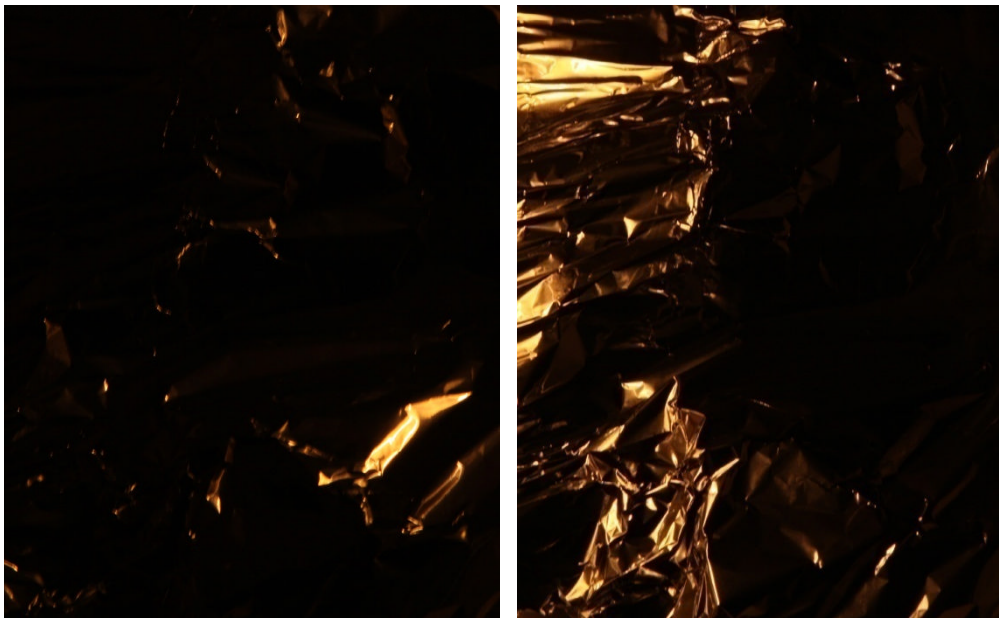


- ディフューズ(拡散反射)の特徴
  - 分子構造により特定の波長が吸収される
    - 色がつく
  - 反射(放射)に指向性が(基本的に)無い
    - 分子配列などからの幾何学的影響はある
    - 厳密にはエネルギー保存則などの影響を受けて指向性を持つ



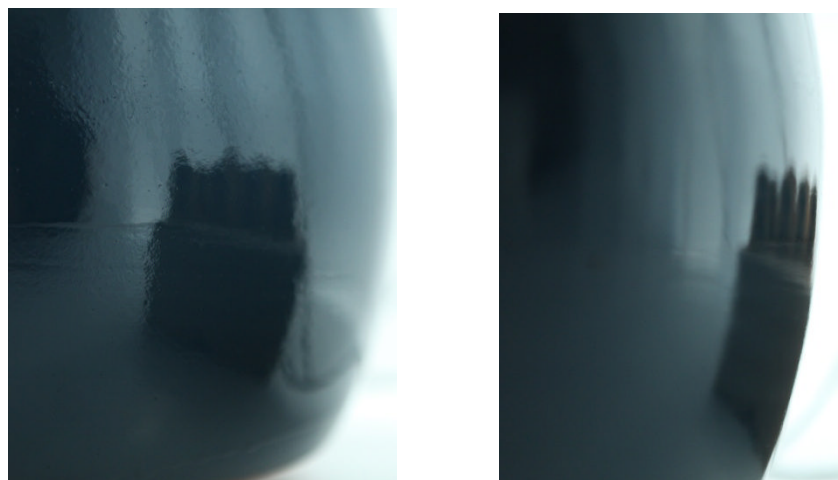


- なぜスペキュラーが重要か？
  - 静止画においてのスペキュラーとディフューズが持つ情報の差が動画においては拡大する
    - つまりスペキュラーの変化において人間はより詳細な物体の形および質感の情報を得ることが可能になる

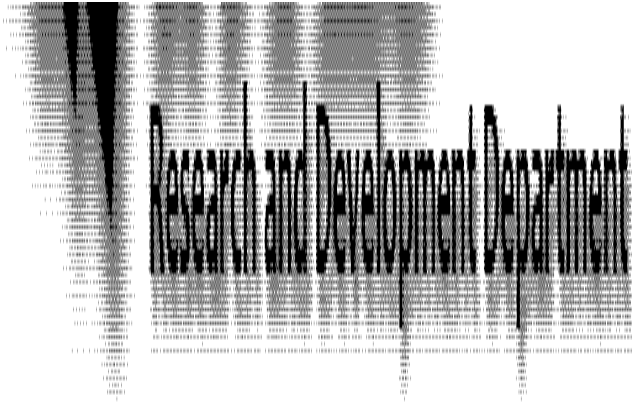


Research and Development Department

- 反射(スペキュラー)と屈折(ディフューズ)の量はどうやって決まるのか?
  - フレネル方程式
    - フレネルとは反射という仕組みにつくエフェクト?
      - 違います
    - 反射と屈折量を決定しているのがフレネル
      - フレネル効果がない物質は存在しない



# フレネルの例



## ●フレネル方程式

物体に光が入射したときの反射率および透過率  
(屈折する光)に関する式

$$r_p = \frac{n_1 \cos \beta - n_2 \cos \alpha}{n_1 \cos \beta + n_2 \cos \alpha}$$

$$t_p = \sqrt{\frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha}} \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta}$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta}$$

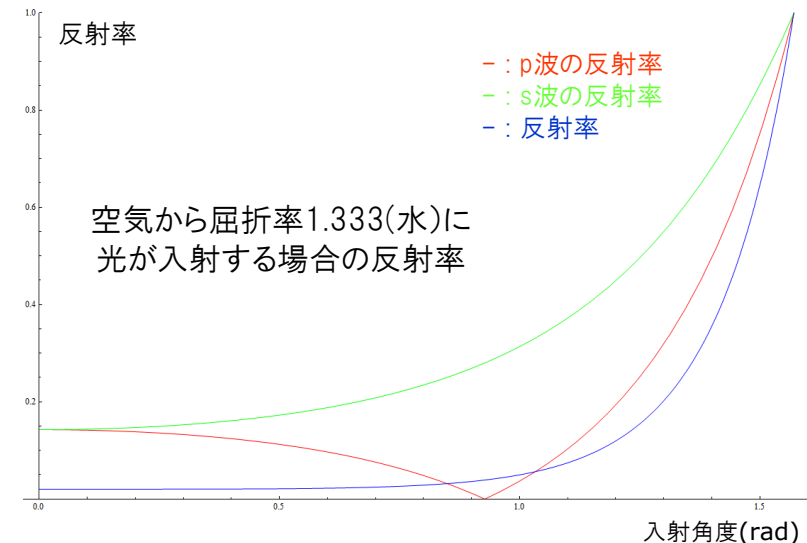
$$t_s = \sqrt{\frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha}} \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta}$$

$\alpha$ :入射角  
 $\beta$ :屈折角  
 $n_1$ :入射媒体の屈折率  
 $n_2$ :出射(屈折)媒体の屈折率  
 $r_p$ :p波の振幅反射率  
 $t_p$ :p波の振幅透過率  
 $r_s$ :s波の振幅反射率  
 $t_s$ :s波の振幅透過率

$$r = 0.5r_p^2 + 0.5r_s^2$$

$$t = 0.5t_p^2 + 0.5t_s^2$$

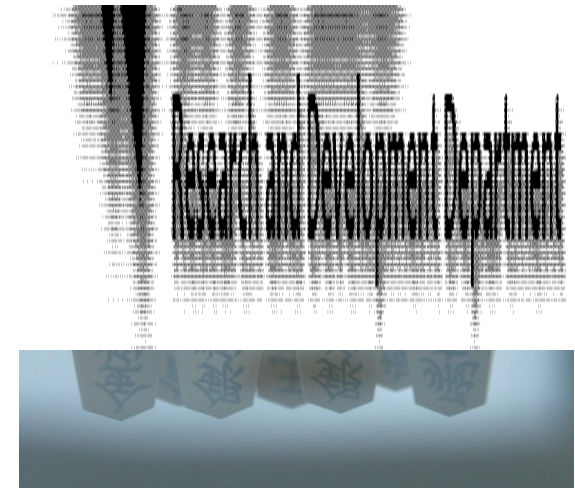
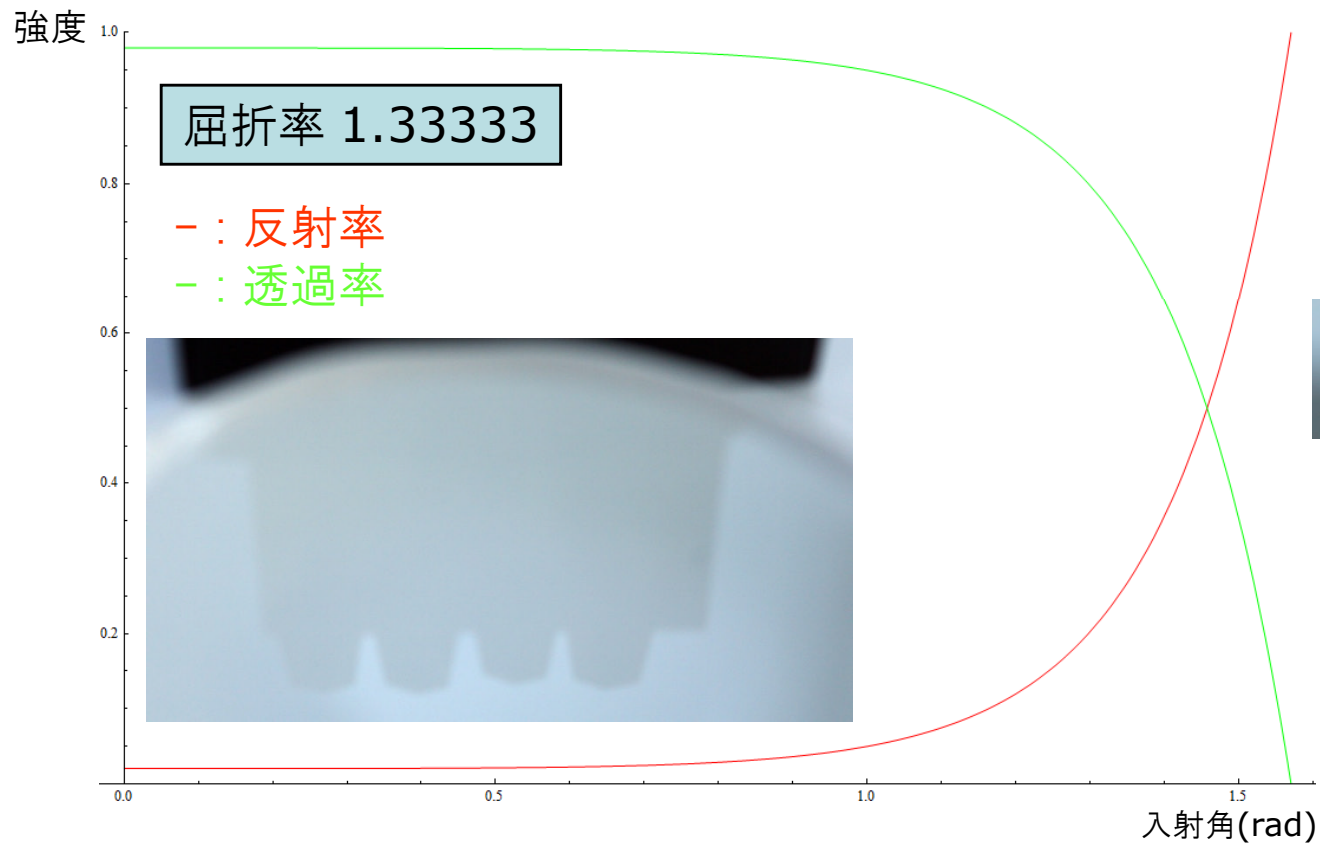
$r$ :位相を考慮しない場合の反射率  
 $t$ :位相を考慮しない場合の透過率



# フレネルによる効果

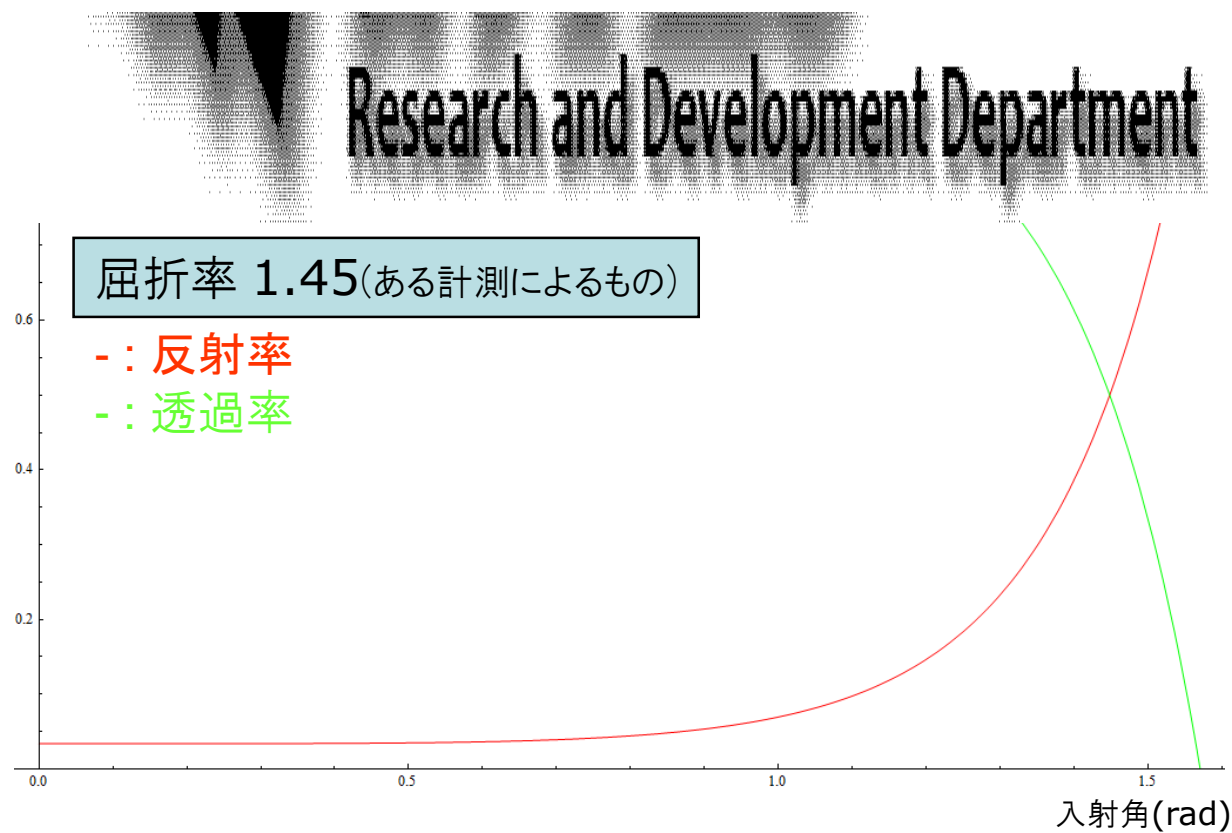


- 水による反射と屈折



- 人間の肌による反射と屈折

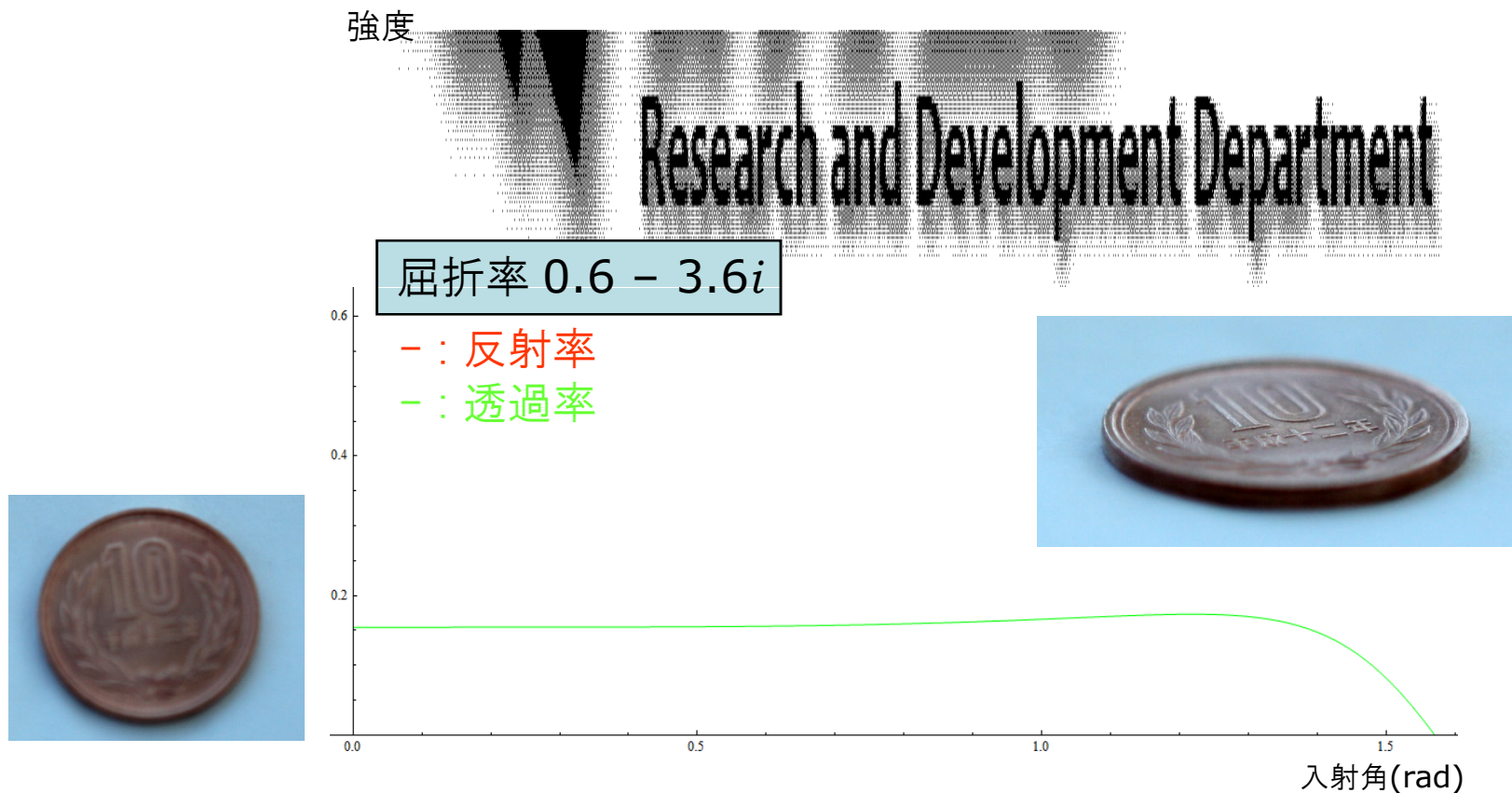
強度



# フレネルによる効果



- 銅による反射と屈折



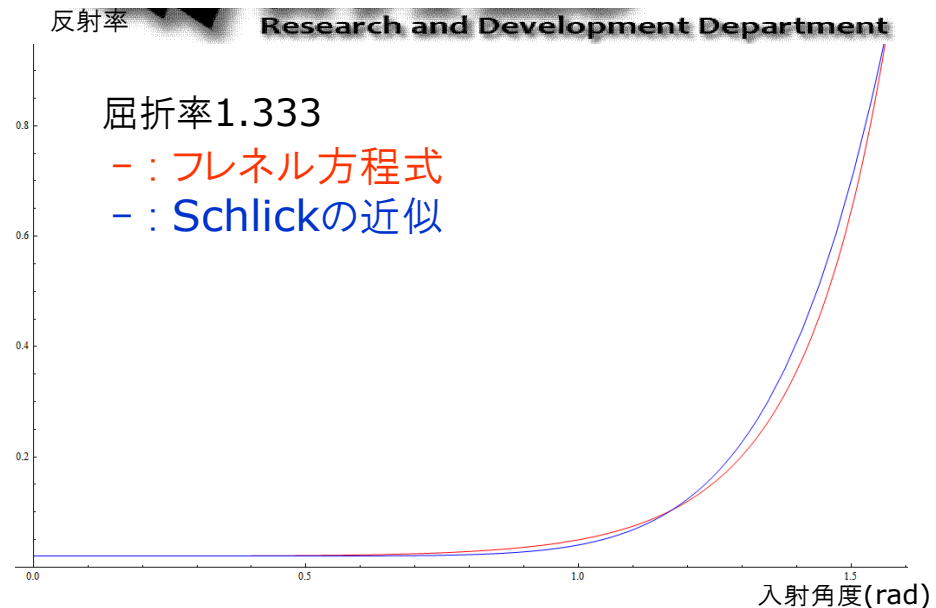
- 計算量の少ないフレネル方程式の近似式
  - $1/F_0$ が全反射と垂直反射の比を表している

$$F_{schlick} = (1.0 - F_0)(1 - \cos \theta)^5 + F_0$$

$F_0$  : 垂直反射時の反射率  
以下の式で求めることができる

$$F_0 = \left( \frac{1-n}{1+n} \right)^2$$

厳密には誘電体にしか適用できないが  
こだわらなければ非誘電体もそれなりに近似できる  
(複素屈折率の場合は複素数のまま計算すること)





- 反射量は屈折率で決まる
  - 実際の反射率は見る角度で想像以上に変化する

鉄	2.36
酸化第二鉄	3.01
金	0.34-3.2 <i>i</i>
銀	0.17-3.4 <i>i</i>
銅	0.6-3.6 <i>i</i>
石英	1.45
サファイヤ	1.76
水	1.33
酸化チタン	2.52
象牙	1.54
炭素	2.0-1.0 <i>i</i>

ある波長での屈折率のサンプル

反射率

- : 石英
- : 金
- : 酸化チタン
- : サファイヤ

Research and Development Department

反射率の比較

入射角度(rad)

- 通常フレネルはSchlickの近似で実装される
  - フレネルシェーダやBlinnシェーダなど
    - 弊社エンジンでは $f_0$ の値だけをツール上で直接入力できるようになっていた
      - たとえば平均的な屈折率1.5では $f_0$ の値は0.04
        - » つまり垂直反射と水平反射の比は25倍
      - 感覚的には角度によって25倍のスペキュラーの変化は受け入れ難かった

25倍も明るさの差!

- そこで感覚的に0.3とか0.5などを設定する
  - 結果的に垂直反射率は大きくなる
    - 物理的に正しい近さのスペキュラー強度を設定するとスペキュラーが強くて見えてしまう
      - スペキュラー強度を下げてしまう
    - エッジ(glazing angle)でのスペキュラーが弱くなってしまふ
      - バックライトなどでのスペキュラーによるエッジが表現されない
    - 現在では複素屈折率の入力や材質の入力を出来るように変更



# $f_0$ が大きすぎると



スペキュラーの強さを弱めると  
エッジも弱くなってしまふ

エッジを強くすると  
垂直方向のスペキュラーが強すぎる



# レンダリングとは?



- レンダリング方程式(BRDF版)

- この式を解くことにより画像を得ることが出来る

$$\underbrace{L_o(x, \omega)}_{\text{出射される光 (放射輝度)}} = \underbrace{L_e(x, \omega)}_{\text{自己放射}} + \int_{\Omega} \underbrace{f_r(x, \omega', \omega)}_{\text{BRDF}} \underbrace{L_i(x, \omega')}_{\text{入射する光 (放射輝度)}} \underbrace{(\omega' \cdot \mathbf{n})}_{\text{BRDFの コサイン成分}} d\omega'$$

眼に届く光は

- その地点が自分で光っている分と
- その地点にあらゆる方向から入射して来た光が反射した光をすべて足し合わせた光になるということ

$x$ : 出射が起こる座標

$\omega$ : 出射方向

$\omega'$ : 入射方向

$\mathbf{n}$ :  $x$ の位置における法線

- Bidirectional Reflectance Distribution Function (双方向反射分布関数)
  - ある物質上の一点( $x$ )において
  - ある方向( $\vec{\omega}'$ )から入射してきた光と
  - ある方向( $\vec{\omega}$ )に出て行く光の
  - 比( $f_r$ )を表す関数

$$f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) = \frac{dL_r(x, \vec{\omega}')}{L_i(x, \vec{\omega}')(\vec{\omega}' \cdot \vec{n})d\vec{\omega}'}$$

$$L_r(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})L_i(x, \vec{\omega}')(\vec{\omega}' \cdot \vec{n})d\vec{\omega}'$$

$x$ : 反射が起こる座標

$\vec{\omega}$ : 出射光の向き

$\vec{\omega}'$ : 入射光の向き

$\vec{n}$ :  $x$ の位置における法線

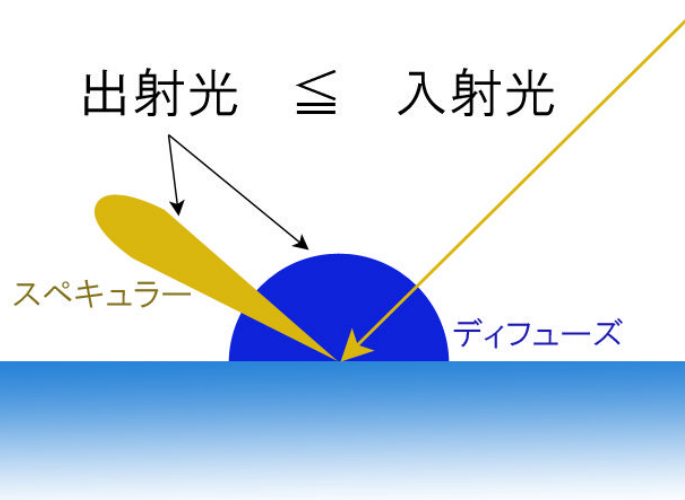
$f_r$ : BRDF

$dL_r$ : 反射された放射輝度

$L_i$ : 入射する放射輝度

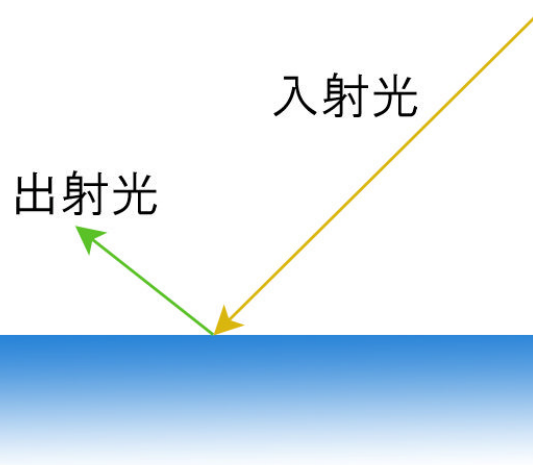
- エネルギー保存則
  - ある一方向から入射した光のエネルギーはその光が反射して出射した光の総量以上になる

$$\int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega})(\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}' \leq 1, \forall \vec{\omega}$$



- ヘルムホルツの相反性(Reciprocity)
  - BRDF関数は入射方向と出射方向を入れ替えても値が変化しない

$$f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) = f_r(x, \vec{\omega}, \vec{\omega}')$$





- BRDFをいくつかのパラメータで近似した式
  - たくさんのBRDFモデルが提唱されている

BRDFモデル	備考
Cook-Torrance	物理モデルを元に比較的正確なスペキュラーの再現を可能にしたモデル
Blinn-Phong	本来(Blinn)はCook-Torranceを元に、ハーフベクトルや利用して高速化を行った簡略化モデル。ゲームではいろいろなBlinn-Phongと呼ばれるモデルが存在している
Ward	幾何減衰項はないが、それなりに物理的正確性を備えている。異方性もあり。Normal Distribution Function(NDF)はBeckmann分布改
Ashikhmin	エネルギー保存則を満たす異方性つきBlinn-Phongといった感じのモデル。幾何減衰はない
Kajiya-Kay	髪の毛の異方性を再現するモデル。現在ではMarschnerモデルが一般的
LaFortune	Measured BRDFのフィッティングに向いているBRDFモデル
Oren-Nayer	幾何減衰を考慮したディフューズモデル

BRDFモデルの一例

# BRDFモデルの利点

- (計測された)BRDFデータに比べて
  - データ量が少ない
  - パラメータで質感をコントロールできる
    - フィッティング用モデルだと直感的コントロールが難しいものもある

$D_1 = \cos^{c_1} \alpha \quad \leftarrow \text{Blinn-Phong}$ $D_2 = e^{-(\alpha c^2)^2}$ $D_3 = \left( \frac{c_3^2}{\cos^2 \alpha (c_3^2 - 1) + 1} \right)^2$ <p>D項(NDF)は3種類の紹介されている 係数cについては論文をご覧ください</p>	$F = \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left( 1 + \frac{(c(g+c)-1)^2}{(c(g-c)+1)^2} \right)$ $c = (E \cdot H)$ $g = \sqrt{n^2 + c^2} - 1$ <p>フレネル項(F)</p>	$G = \min(1.0, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot E)}{E \cdot H}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{E \cdot H})$ <p>幾何減衰項(G)</p>
---	---	---

$$\text{Blinn} = \frac{D \cdot F \cdot G}{N \cdot E}$$

ゲームで代表的なBRDFモデルであるBlinnモデル

- モデルによっては...
  - 特定の質感のみを再現する
  - 複雑な質感や高品質な質感を再現できるモデルは計算負荷が高い
    - リアルタイムレンダリングでは使いづらい?

$$specular(L, E) = \frac{\sqrt{(shininess_u + 1)(shininess_v + 1)} (N \cdot H)^{\frac{shininess_u (H \cdot U)^2 + shininess_v (H \cdot V)^2}{1 - (H \cdot N)^2}}}{8\pi (H \cdot E) \max(N \cdot E, N \cdot L)} F(E \cdot H)$$
$$F(E \cdot H) = R_s + (1 - R_s)(1 - (E \cdot H))^5$$
$$diffuse(L, E) = \frac{28R_d}{23\pi} (1 - R_s) \left(1 - \left(1 - \frac{N \cdot L}{2}\right)^5\right) \left(1 - \left(1 - \frac{N \cdot E}{2}\right)^5\right)$$

Ashikhmin-Shirleyモデル

- BRDFモデルをシェーダとして実装する
  - BRDFは微分方程式であることに注意!
  - BRDFを利用してレンダリングすること (レンダリング方程式の解を求める)は積分を行うということ

出射する光を求めるということは

$$L_r(x, \vec{\omega}) = \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}'$$

BRDF  $f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) = \frac{\overset{\text{微分方程式}}{dL_r(x, \vec{\omega}')}}{L_i(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}'}$

# よりよい質感を目指して



- 今までのBRDFモデルでは何が問題？
  - 広く使用されているBlinn-Phongで検証
    - D項はPhongのNDFを利用(ハーフベクトル $H$ を利用)
    - F項はSchlickの近似を利用
    - 問題を単純化するためにG(幾何減衰)項は考慮しない
    - G項を省いたため $(N \cdot L)/(N \cdot E)$ は考慮しない
      - 詳しくは参考文献[1],[2]をご覧ください

$$Out = \underbrace{R_d(N \cdot L)}_{\text{ディフューズ項}} + R_s \underbrace{\left( F_0 + (1 - F_0)(1 - E \cdot H)^5 \right)}_{\text{Schlickの近似}} \underbrace{(N \cdot H)^{shininess}}_{\text{PhongのNDF}}$$

N : レンダリング対象の微小平面の平均法線ベクトル

L : 入射する光のベクトル

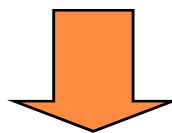
E : 視線ベクトル

H : LとEのハーフベクトル

$$BRDF_{Blinn} = \frac{D \cdot F \cdot G}{N \cdot E}$$

- 本来Schlickの近似に使う $\cos\theta$ は入射ベクトルと法線の内積
  - しかしここではハーフベクトルと視線(または入射)ベクトルの内積になっている

$$F_{\text{specular}}(F_0) = F_0 + (1 - F_0)(1 - E \cdot H)^5$$



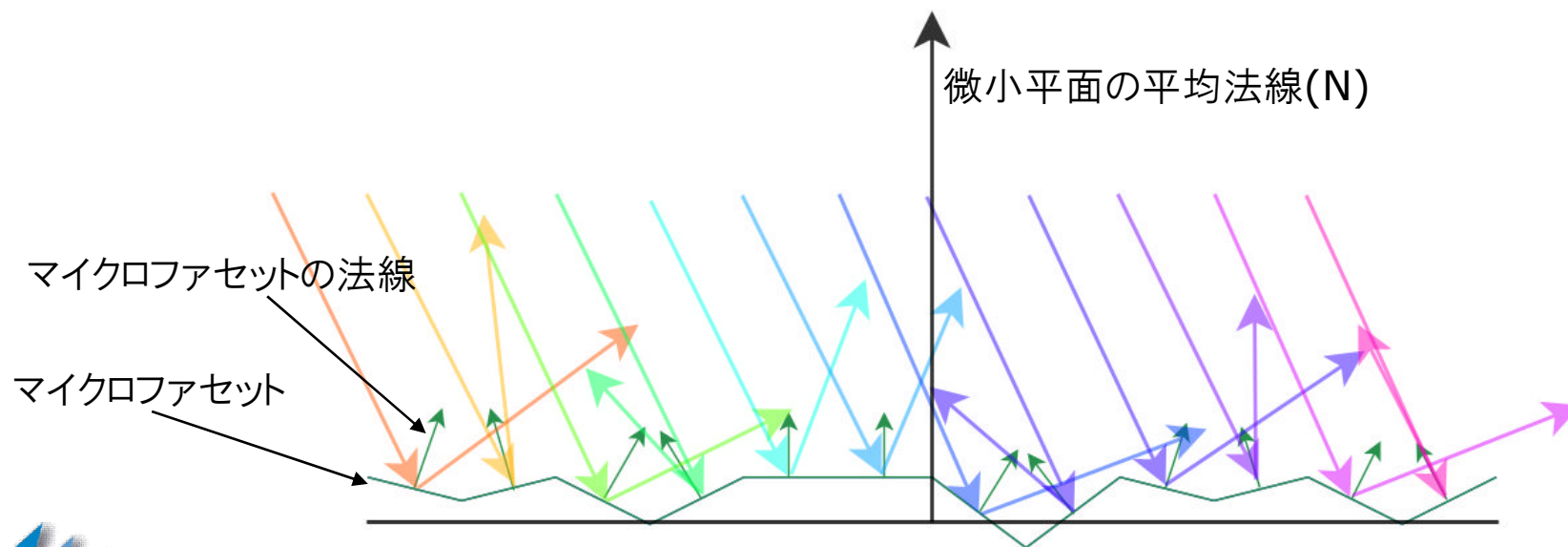
なぜ?

- 本来鏡面反射は法線に対して入射光と同じ角度にしか反射しない
  - しかし光沢(glossy)な鏡面反射ではそれ以外の角度にも光が反射している
    - 微小平面内での物体平面の凸凹が反射光を拡散させている
      - マイクロファセット

微小平面の平均法線(N)

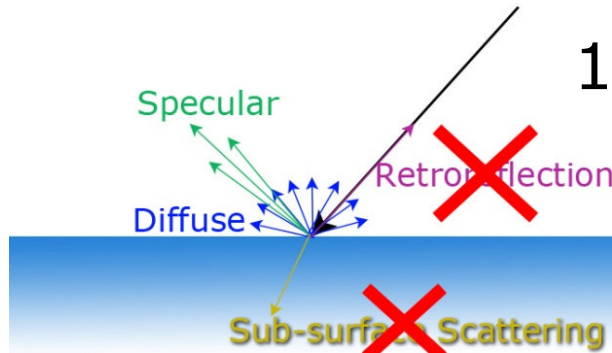
マイクロファセット →

- 視線方向に反射している光はその方向に鏡面反射させるマイクロファセットからの光の集合
  - この時のマイクロファセットの法線は視線方向と入射光の中間になっている
    - ハーフベクトル(H)
    - 結果としてハーフベクトルと視線ベクトルとの内積になっている





- 考察を簡単にするために



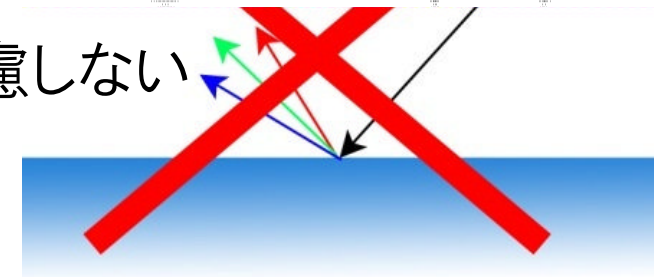
## 1. 吸収を考慮しない

- 入射した光はすべて(スペキュラーやディフューズなどで)で反射すると考える



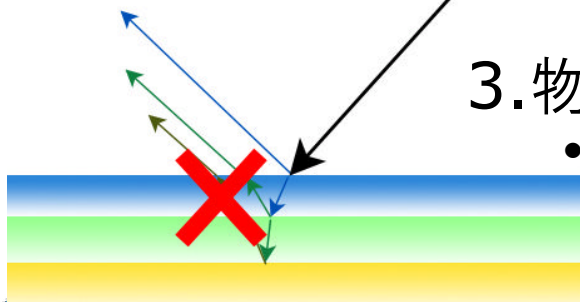
## 2. 物理的性質の波長依存性を考慮しない

- 物質には色が無いと考える

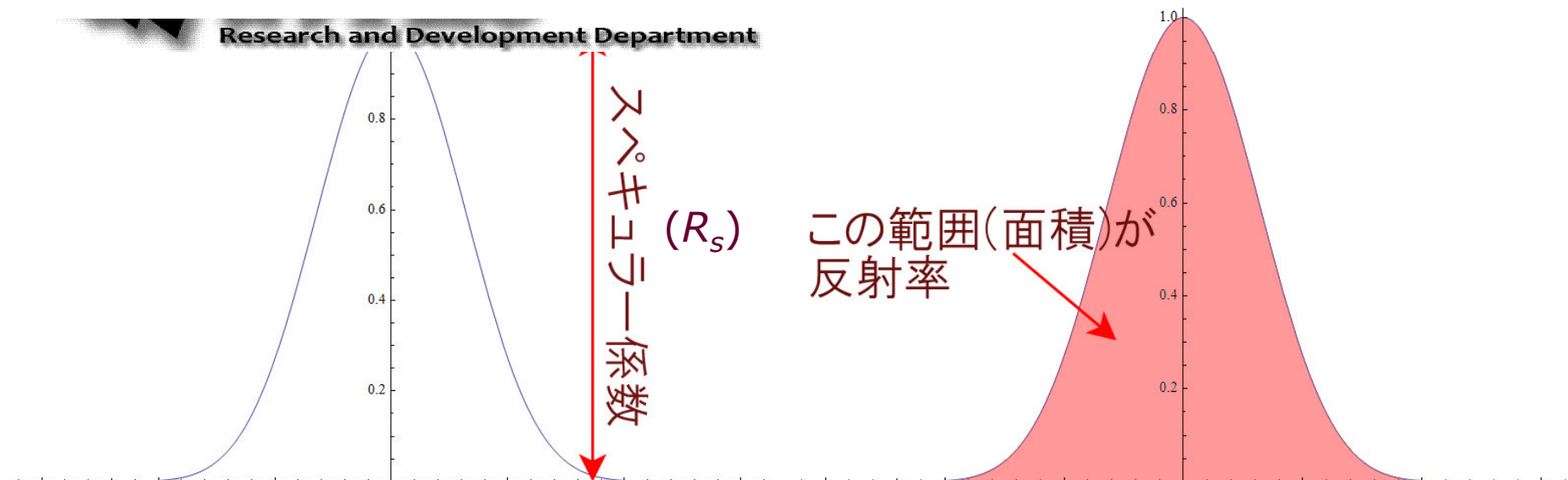


## 3. 物質は一様な単一分子で構成されている

- 複数物質のレイヤーや乱雑度の変化は考慮しない



- 代表的な問題
  - 各パラメータが物理的な意味をもたない
    - 例) スペキュラー係数( $R_s$ )が反射率を表しているわけではない
  - エネルギー保存則および相反性を満たしていない
    - 特にエネルギー保存則はビジュアルに差を及ぼす



- フレネル方程式を考慮すると
  - 物質の屈折率が与えられればその物質の反射率が求まる
    - スペキュラのピーク( $R_s$ )がわかるわけではない

屈折率	垂直反射率 (specular)
鉄(2.36)	0.164
金(0.34-3.2 <i>i</i> )	0.887
石英(1.45)	0.034
サファイヤ(1.76)	0.076
炭素(2.0-1.0 <i>i</i> )	0.2

Research and Development Department

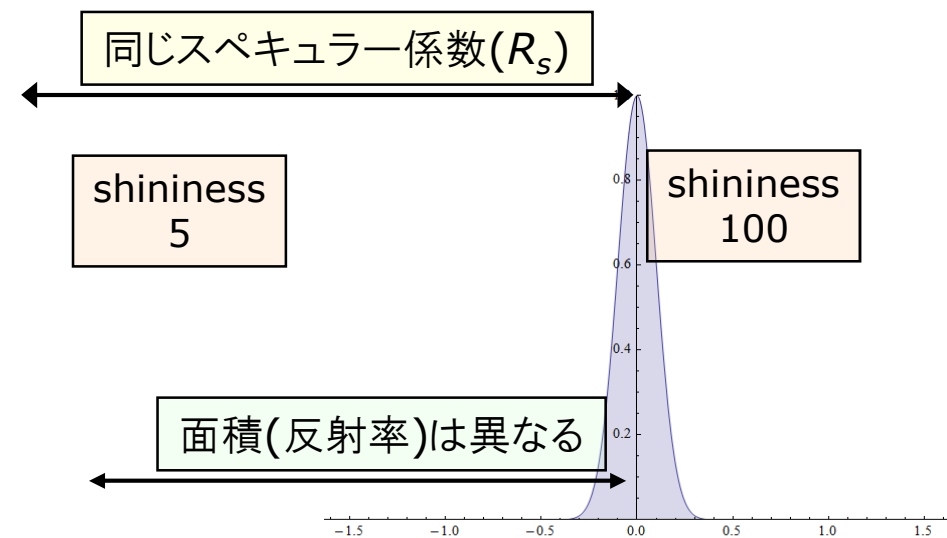
$=R_s$   
 $\neq$  反射率

- 反射率は入射した光がどのくらい反射されるかを表す
  - 本来はスペキュラーもディフューズも含めた反射率だがここではスペキュラーの反射率のみを考える
    - Blinn-Phongではshininessを動かしてもスペキュラーのピーク( $R_s$ )は変化しない
      - 反射率が変化している

$$\rho(x) = \frac{\int_{\Omega} \int_{\Omega} f_r(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) L_i(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}' (\vec{\omega} \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}}{\int_{\Omega} L_i(x, \vec{\omega}') (\vec{\omega}' \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}'}$$

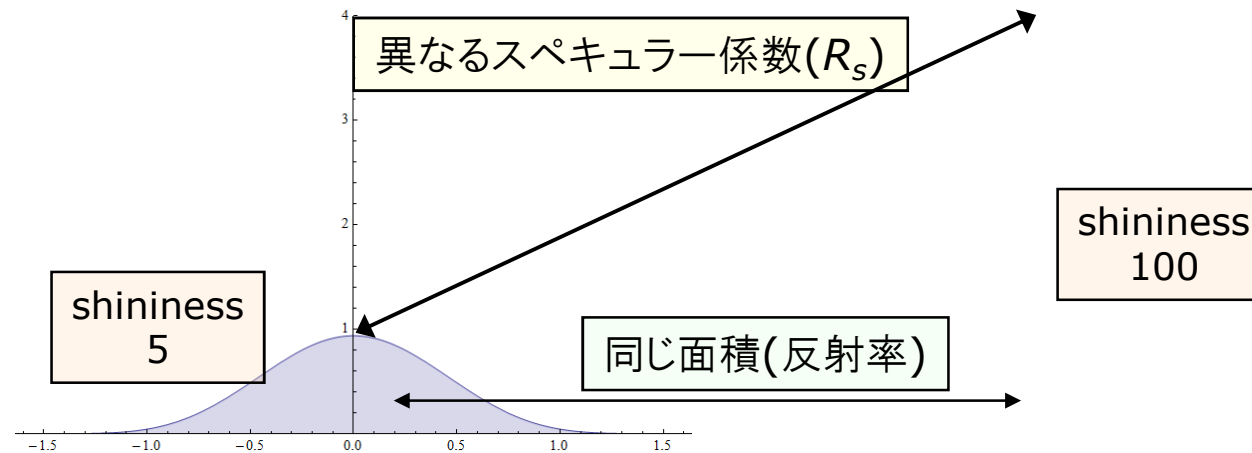
反射率の定義式

反射光と入射光の比



- 反射率を一定にするということは
  - 反射によって放射された光の総和が一定
    - shininessが変化する=スペキュラー係数( $R_s$ )が変化する

$$\int_{\Omega} (N \cdot H)^{shininess} d\omega = \text{一定}$$



- スペキュラーの係数をshininessから求める
  - スペキュラー式を出射半球上で積分する
    - ライトは垂直入射と考える(厳密ではない近似)

$$\int_{\Omega} (H \cdot N)^{shininess} d\omega = \frac{4\pi(2 - 2^{-\frac{shininess}{2}})}{shininess + 2}$$

↑  
スペキュラーで反射した光の総量を表す

- スペキュラー総量で正規化する
  - スペキュラー総量の逆数を乗算する

$$Specular = R_s \frac{(shininess + 2)}{4\pi(2 - 2^{-\frac{shininess}{2}})} F_{schlick}(F_0)(N \cdot H)^{shininess}$$

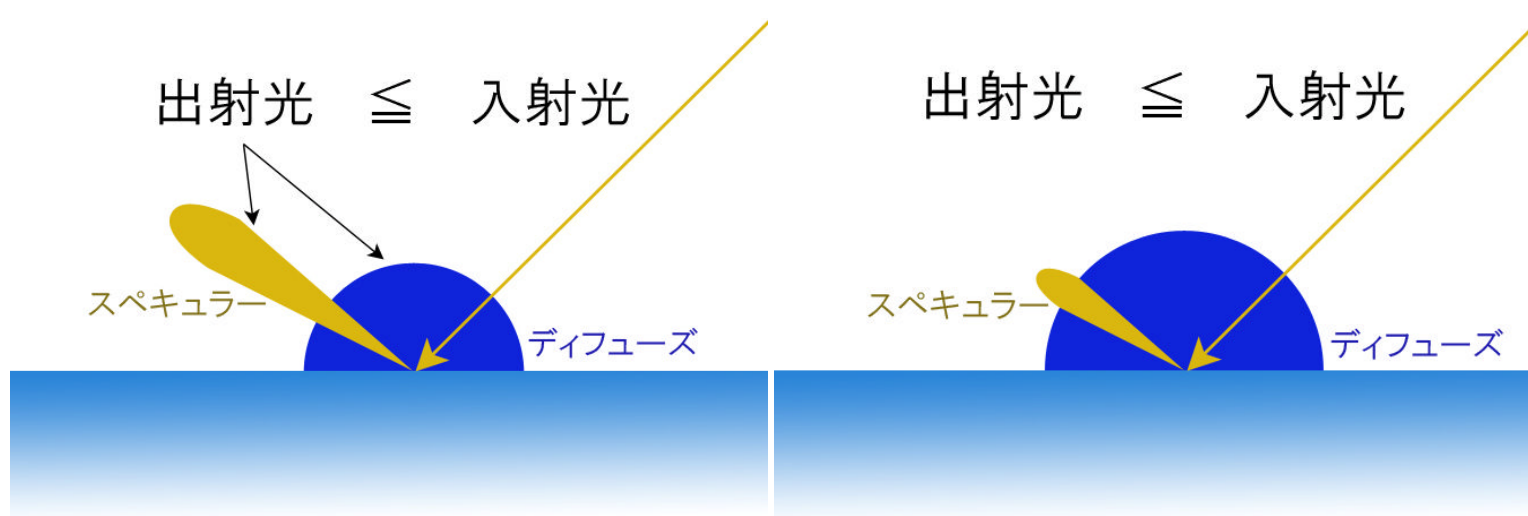
代入されたスペキュラーの式

$$\text{ただし } F_{schlick}(F_0) = F_0 + (1 - F_0)(1 - E \cdot H)^5$$

- 反射した光の総和が入射した光を超えない

– 前提から

- 入射した光 = ディフューズ + スペキュラー
- スペキュラーを先に求めたのであれば
- ディフューズ = 入射した光 - スペキュラー





- スペキュラーで反射した量の残りがディフューズになる
  - ここでの「スペキュラー」は視線方向に発生している  
スペキュラーではなく入射した光に対して発生した  
スペキュラー反射の総量

Research and Development Department

$$Diffuse = (1 - R_f \cdot F_{schlick}(F_0)) R_d (N \cdot L)$$

ディフューズとして  
視えている反射光

入射光に対しての  
スペキュラ

ただし $R_f$ は(フレネル項を除いた)  
スペキュラで反射光の総量  
スペキュラー反射量は正規化しているので  
 $R_f = R_s$ になる

入射光

- 入射した光に対して発生しているスペキュラーの総量なのでE・Hに対してのSchlickではなくL・Nに対してのSchlickになる
  - ただしこれはスペキュラー側のフレネルを考慮していない近似式

$$Diffuse = \left(1 - R_s \left(F_0 + (1 - F_0)(1 - N \cdot L)^5\right)\right) R_d (N \cdot L)$$

↓ エネルギー保存するために

この式の正規化係数はLambertのBRDFの $1/\pi$

- エネルギー保存則を満たすディフューズ
  - 完全には満たしていない近似
    - 特にglazing angleでの変化を正しく捉えられていない
    - 相反性を満たしていない

$$Diffuse = \frac{1}{\pi} \left( 1 - R_s \left( F_0 + (1 - F_0)(1 - N \cdot L)^5 \right) \right) R_d (N \cdot L)$$

エネルギー保存を近似した式

- 物理的正確性を増したBlinn-Phong
  - すべてを代入すると

$$Out = R_d \frac{1}{\pi} (1 - R_s F_{diffuse}(F_0)) (N \cdot L) + R_s \frac{(shininess + 2)}{4\pi(2 - 2^{\frac{shininess}{2}})} F_{specular}(F_0) (N \cdot H)^{shininess}$$

最終的に導出された正規化Blinn-Phong

ただし

$$F_{specular}(F_0) = F_0 + (1 - F_0)(1 - E \cdot H)^5$$
$$F_{diffuse}(F_0) = F_0 + (1 - F_0)(1 - N \cdot L)^5$$

- スペキュラーの正規化式の負荷が高い?
  - 近似できないか?

$$\frac{(shininess + 2)}{4\pi(2 - 2^{\frac{shininess}{2}})}$$

正規化係数

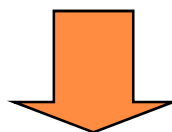
Research and Development Department

shininess

ほとんどりニア?

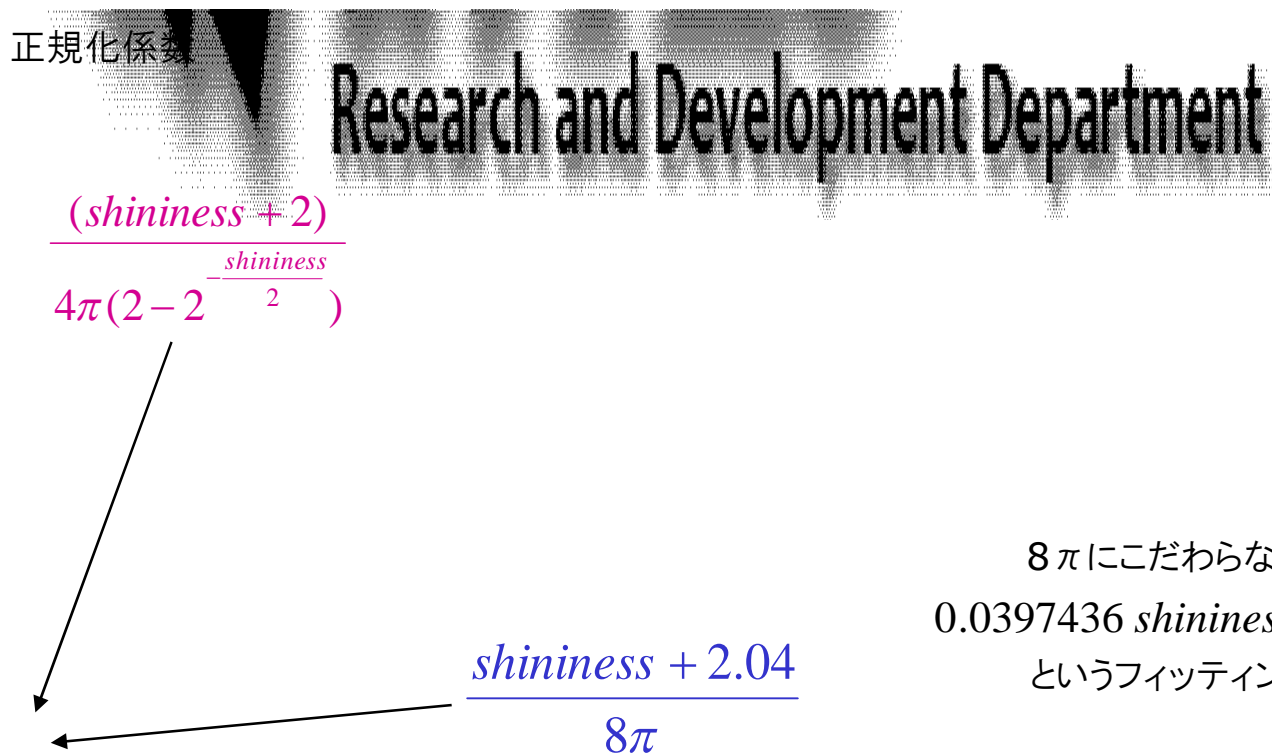
- リニアの式で近似してみる

$$\frac{(shininess + 2)}{4\pi(2 - 2^{-\frac{shininess}{2}})} = \frac{shininess + n}{8\pi}$$



nの値は?

- nの値はshininessの定義域で変わってくる
  - しかしほとんど誤差
    - 今回は  $n = 2.04$



shininess

- 正規化処理をオフラインで計算する
  - shininessとスペキュラー係数
    - テクスチャで変動しないのなら同じマテリアル内で一定なのでシェーダで計算する必要がない
    - shininessマップがあるならそのマップに各shininessに対応するスペキュラー係数を埋め込んでおく
  - ディフューズのエネルギー保存
    - 定数部分( $1/\pi$ )はアルベドテクスチャで代用できる
    - Schlick部分は( $1-F_0$ )で近似する

$$\frac{(shininess + 2)}{4\pi(2 - 2^{\frac{shininess}{2}})}$$

正規化係数

shininessが定数なら  
正規化係数も定数

shininessと $R_s$ は  
対応している





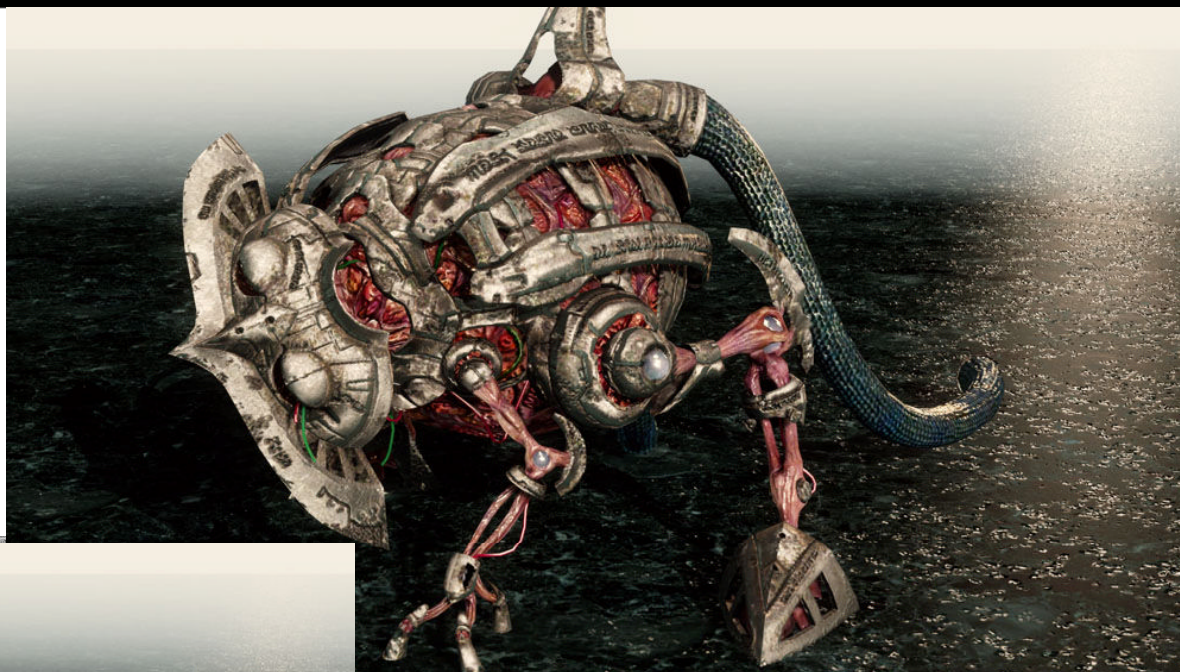
Research and Development Department

Blinn-Phong

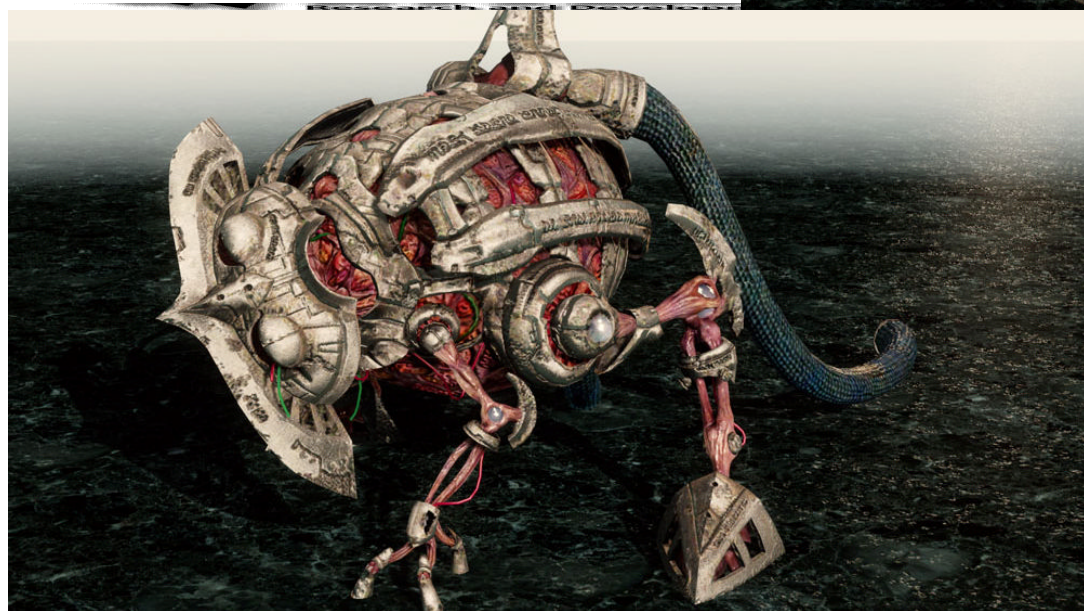


正規化Blinn-Phong

# 結果



Blinn-Phong



正規化Blinn-Phong

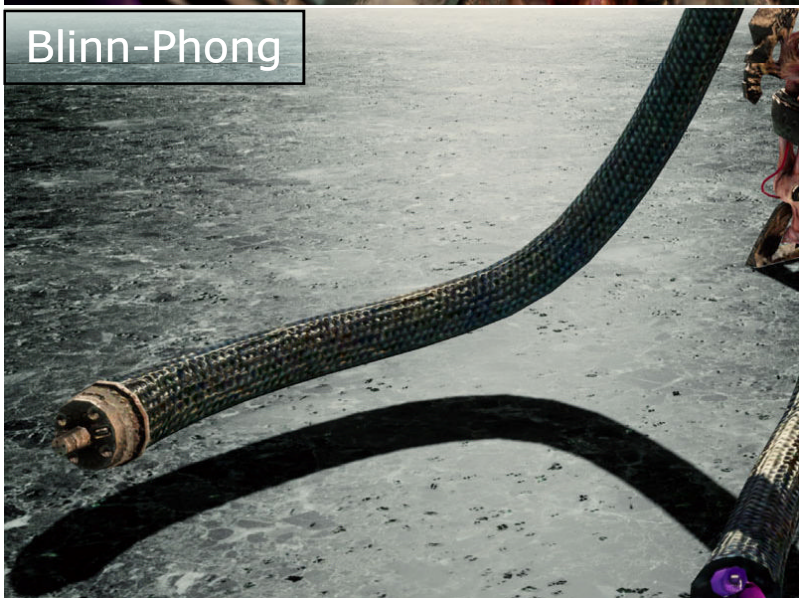
# 結果



Blinn-Phong

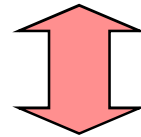


正規化Blinn-Phong Research and Development Department



## Blinn-Phongの式

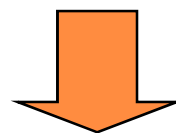
$$Out = R_d (N \cdot L) + R_s F_{specular} (F_0) (N \cdot H)^{shininess}$$



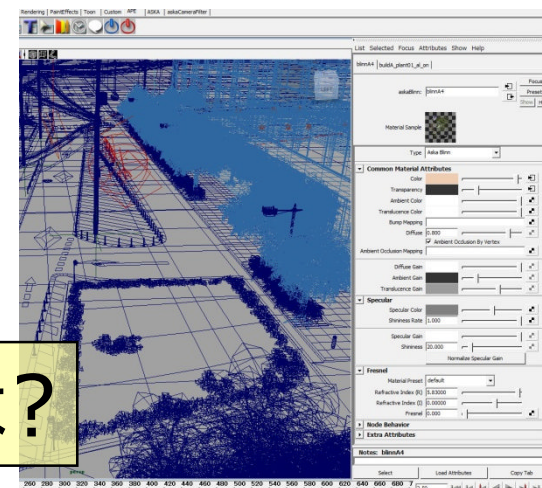
$$Out = R_d \frac{1}{\pi} (1 - R_s F_{diffuse} (F_0)) (N \cdot L) + R_s \frac{(shininess + 2.04)}{8\pi} F_{specular} (F_0) (N \cdot H)^{shininess}$$

## 改良されたBlinn-Phongの式

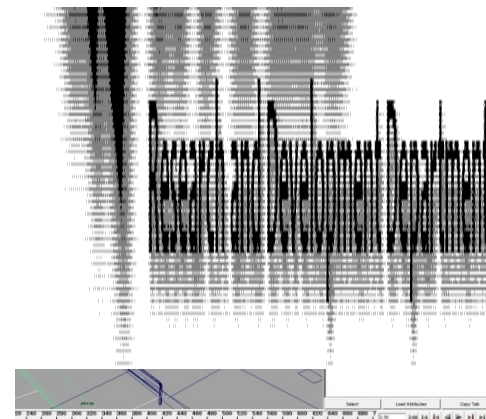
- 典型的(だと思われる)Blinn-Phongの調整
  - スペキュラー係数( $R_s$ )をいい感じに調整
  - shininessをいい感じに調整
  - フレネル係数をいい感じに調整
  - カラー系パラメータをいい感じに調整
  - 各種テクスチャが必要な場合にはそれを描く
  - レンダリングしてみていい感じになるまで上記の作業を繰り返す



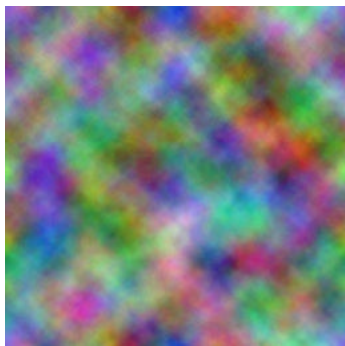
正規化Blinn-Phongでは?



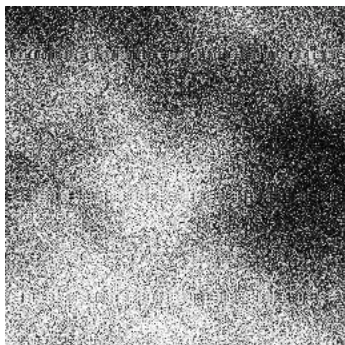
- 物理的正確性がシェーダ内で保証されるので
  - テクスチャによる変化における正確性
    - 目的の物質の屈折率を求める
      - 屈折率を入力
    - shininessで表面の光沢を調整
      - shininessマップでも $R_s$ は自動調整
    - スペキュラー係数 $R_s$ は金属など選択反射が起きない物質では調整の必要は基本的でない
    - (ディフューズ)カラーマップも純粹にアルベドを描きこむ
      - 明るさとしての調整はエネルギー保存しているので必要ない



- Blinn-Phongにおいて各種テクスチャの意味を検証してみる
  - 検証する正規化Blinn-Phongに関してはこのスライドで導出したものを利用する



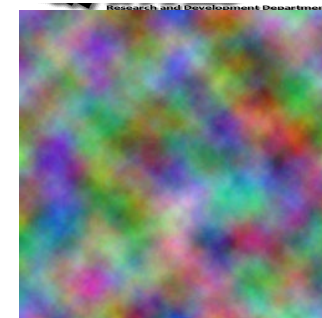
スペキュラーマップ



Shininessマップ

0	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30	31
32	33	34	35	36	37	38	39
40	41	42	43	44	45	46	47
48	49	50	51	52	53	54	55
56	57	58	59	60	61	62	63

フレネルマップ




アルベドマップ



ノーマルマップ

- スペキュラーにおける反射能を定義する

Blinn-Phong	正規化Blinn-Phong
<ul style="list-style-type: none"><li>• 波長(色)におけるスペキュラー反射のピークの定義</li><li>• 物理的な意味はあまりない</li></ul> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• 波長(色)におけるスペキュラー反射能を定義する</li><li>• 物理的には正しくない</li></ul>  <p>Research and Development Department</p>

(余談)

スペキュラーを反射した(分子構造体にはじかれた)光であること(選択反射)を考慮すると、スペキュラーについている色は光の吸収によって起きているというよりも、波長における屈折率の違いにより起きているので、色が付くだけでなく波長においてスペキュラの形状にも違いがでる。これが金属独特の光沢を生んでいる。また正確なレンダリングのためにはRGBだけの3スペクトルだけでは不十分である。



- スペキュラー拡散度を定義する
  - マイクロスケールにおける表面形状の乱雑差を表す

## Blinn-Phong

- スペキュラーの拡散度を決定する
- 反射率を一定に保つにはスペキュラーマップを調整する必要がある



## 正規化Blinn-Phong

- スペキュラーの拡散度を決定する
- スペキュラーマップを利用せずとも反射率が一定に保たれる



- フレネル計算に影響を与えるテクスチャ

## Blinn-Phong

- フレネル計算における単なる係数
- 物理的正確性はない



## 正規化Blinn-Phong

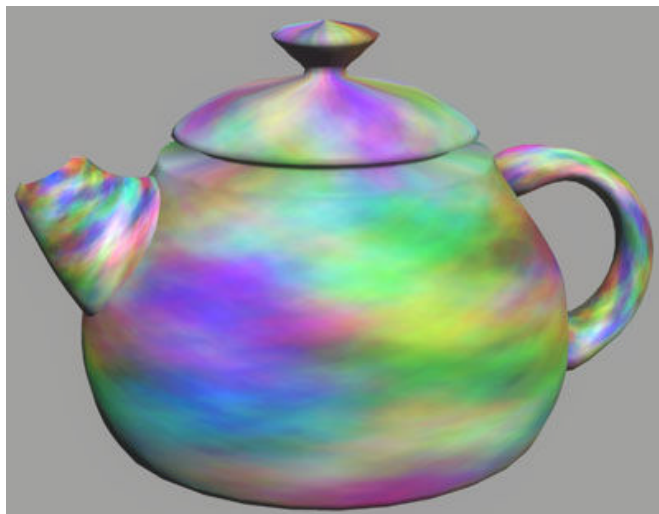
- 結果的に屈折率を意味する
- 物質の種類を定義する
- エネルギー保存をする

Research and Development Department

- ディフューズにおける反射能を定義する

## Blinn-Phong

- ディフューズ計算の色を定義する
- 物理的正確性はない



## 正規化Blinn-Phong

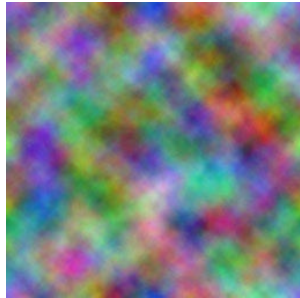
- ディフューズにおいて各波長(色)の反射率の比を定義する
- スペキュラーとの比においてエネルギー保存する



- Shininessマップより大きなスケールでの物質の表面の形状を法線の摂動を利用して定義する
  - 正規化されることによりノーマルマップに関する挙動の差はないがビジュアルとしては法線の摂動による物理的正確性が知覚できる場合がある



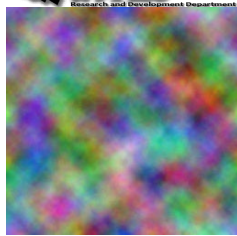
## • Blinn-Phongにおけるテクスチャの重要性



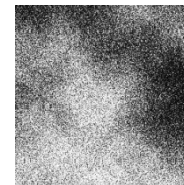
1. アルベドマップ



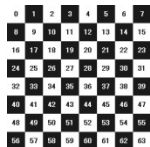
2. ノーマルマップ



3. スペキュラマップ  
スペキュラの強度指定やマスク  
場合によってはノーマルマップよりも重要



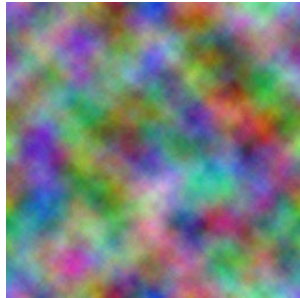
4. shininessマップ  
素材感を指定する



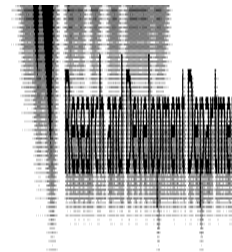
5. フレネルマップ  
Blinn-Phongではあまり重要ではない

番外. Ambient Occlusion Map  
Translucency Mapなど  
必要に応じて使用

- 正規化Blinn-Phongにおけるテクスチャの重要性

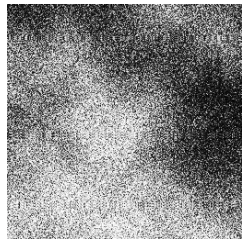


1. アルベドマップ



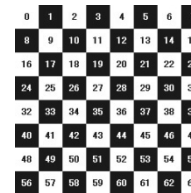
2. ノーマルマップ

ある程度のスケールの大きい (mesoscale) 表面の粗さを定義する



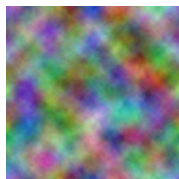
3. shininessマップ

ノーマルマップより細かい (microscale) での表面の粗さを定義する



4. フレネルマップ

物質の違い (屈折率) を定義する



5. スペキュラマップ

正規化Blinn-Phongでは重要度が低い

番外. Ambient Occlusion Map  
Translucency Mapなど  
必要に応じて使用

- プロデューサーにとってのリフレクタンスの重要性

— 計算負荷と品質のコントロール

- 仕組みを知ることでどこを薄くかを物理的に判断できる

- すでにある有名なBRDFモデルを改良または簡略化する場合に勘に頼る必要がない



- アーティストにとってのリフレクタンスの重要性

- 物理的に正確性の高いBRDFモデルを利用すれば少ないパラメータでリフレインのある質感を実現できる

- パラメータを調整する手間を省ける

- テクスチャを利用した質感の正確性

- 物理的なパラメータであれば目的のパラメータを短時間で調整することができる

- 屈折率など



- スペキュラーの拡張
  - 異方性
    - AshikhminやWardなどたくさんのモデルがある
  - スペクトルシェーディング
    - 金属など(可視光内)波長によって大きく屈折率の異なる物質の再現



Research and Development Department

- ディフューズ、スペキュラー以外の再現
  - 再帰性反射(retroreflection)
    - LaFortuneやEdwardsなどサポートしているBRDFモデルを利用
  - 構造色
    - 光の波長近傍の微細構造による反射現象
      - CD
      - 蝶や鳥
      - 薄膜干渉
      - 特殊塗装



- 複数レイヤー(物質)への対応
  - サブサーフェーススキヤッタリング(BSSRDF)
    - 肌、髪
    - 濡れた物質
      - 濡れた石
      - 濡れた服
      - 濡れた肌
    - 関与媒体(Participating Media)
      - 均一(Homogeneous)
      - 不均一(Inhomogeneous)
    - その他



- 測定(Measured)BRDFへの対応
  - BRDFデータベース
  - BRDFモデルへのパラメータフィッティング
  - BTF

- 敬和出

- 一 庄子隆哉
- 一 藤田将洋

石井聡 | 研究開発部  
Research and Development Department  
株式会社



- K. E. Torrance et al. "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces" JOSA 1966
- James R. Blinn "Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures" Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques 1977
- Robert R. Lewis "Making Shaders More Physically Plausible" WCGS 1993
- Eric P. Lafortune et al. "Using the Modified Phong Reflectance Model for Physically Based Modeling" Technical Report CW 197, 1994
- [1] Peter Shirley et al. "A Paractitioners' Assesment of Light Reflection Models" Pacific Graphics, 1997
- [2] Laszlo Neumann et al. "Compact Metallic Reflectance Models" Computer Graphics Forum, 1999
- Michael Ashikhmin et al. "An Anisotropic Phong Light Reflection Model " UUCS-00-014, 2000
- Michael Ashikhmin et al. "An Anisotropic Phong BRDF Model " Journal of Graphics Tools, 2000

# 参考1(スペキュラー積分)



以下の式を出射方向( $E$ )半球上で積分する

$$\int_{\Omega} (H \cdot N)^{\text{shininess}} d\omega \quad \dots(1)$$

積分範囲を $V$ の $Z+$ 軸半球上とすると

$$N = (0, 0, 1)$$

$$E = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$$

前提から  $L = N$  になるので

$$H = \frac{L + E}{|L + E|} = \frac{N + E}{|N + E|} \quad \dots(2)$$

# 参考1(スペキュラー積分)



また

$$\begin{aligned} |N + E| &= \sqrt{\sin^2 \theta \cos^2 \varphi + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + (\cos \theta + 1)^2} \\ &= \sqrt{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta + 2 \cos \theta + 1} \\ &= \sqrt{2(\cos \theta + 1)} \end{aligned} \quad \dots(3)$$

式(2),(3)を利用すると

$$H \cdot N = \frac{N \cdot (N + E)}{|N + E|} = \sqrt{\frac{1 + \cos \theta}{2}} = \cos \frac{\theta}{2} \quad \dots(4)$$



# 参考1(スペキュラー積分)



式(1)に変数変換を行うと

$$= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (H \cdot N)^{shininess} \sin \theta d\theta d\varphi$$

式(4)を代入すると

$$\begin{aligned} &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\cos \frac{\theta}{2}\right)^{shininess} \sin \theta d\theta d\varphi \\ &= \frac{4\pi \left(2 - 2^{-\frac{shininess}{2}}\right)}{2 + shininess} \end{aligned}$$

- ディフューズのエネルギー保存でスペキュラーのフレネルを考慮した式は以下のようになります

$$diffuse = R_d \frac{21}{20\pi(1-F_0)} \left(1 - (1 - N \cdot L)^5\right) \left(1 - (1 - N \cdot E)^5\right)$$

この式の導出に関しては参考文献[1]  
"A Practitioners' Assesment of Light Reflection Models"  
の5.1で解説されています

- 質問はメールでも受け付けています

- [research@tri-ace.co.jp](mailto:research@tri-ace.co.jp)

- このスライドは以下のページでのサポートで表示

- <http://research.tri-ace.com/>

- Star Ocean The Last Hopeの  
画像について

- ©2009 SQUARE-ENIX CO., LTD. All Rights Reserved. Developed by tri-Ace Inc.