

# 光線計測による 質感定量化に向けて

奈良先端科学技術大学院大学

向川康博

# 本日の講演内容について

- 大阪大学・奈良先端大での成果
- 多くの共同研究プロジェクト
  - 多くの共同研究者, 多くの学生



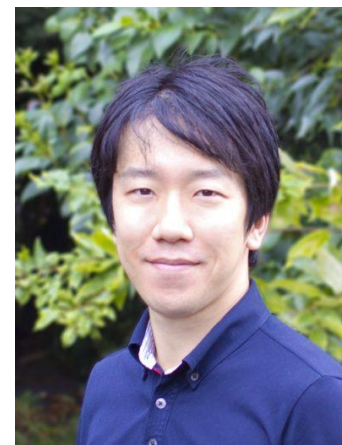
大阪大学  
八木康史副学長



大阪大学  
松下康之教授



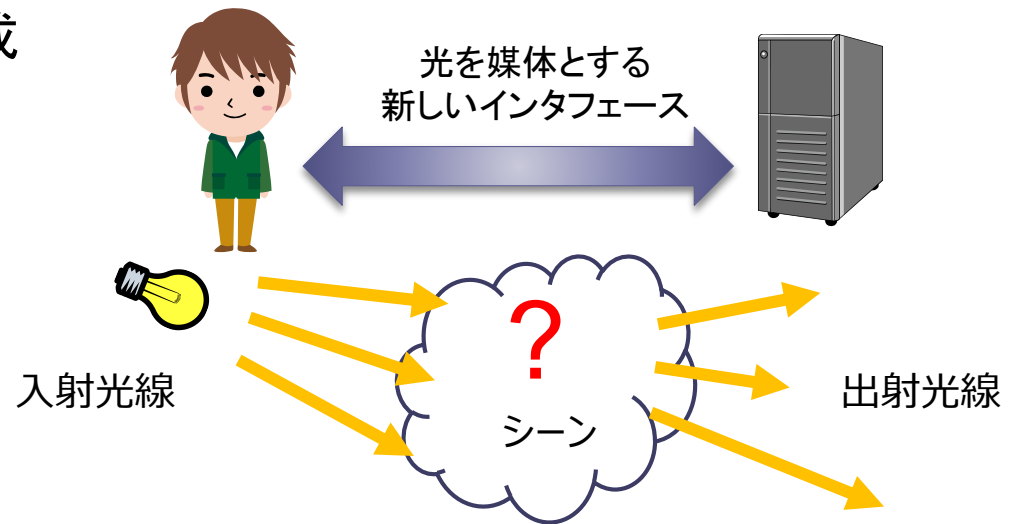
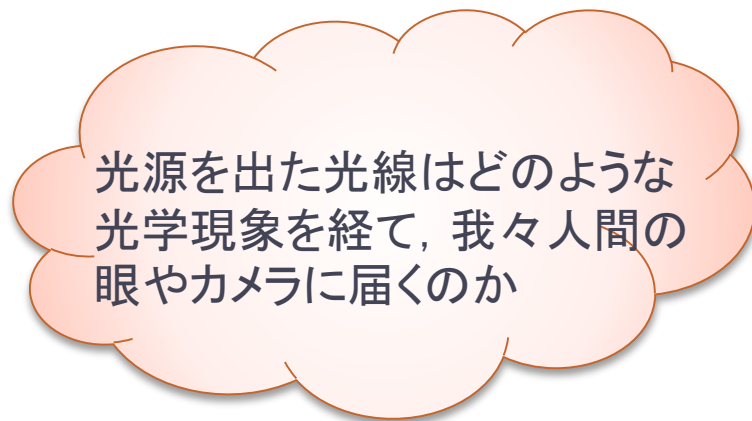
奈良先端大  
船富卓哉准教授



奈良先端大  
久保尋之助教

# 画像ではなく**光線を観る**コンピュータビジョン

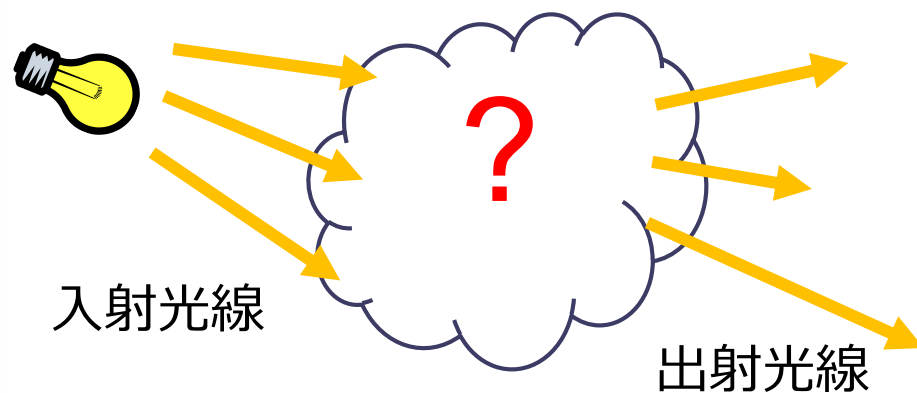
- 人間は照明に対する反応からシーンを理解している
- コンピュータも同様の機能を持つべき. そのためには
  - 光線を計測
  - 光線を解析
  - 光線から画像を再構成



**光学現象:** 反射, 散乱, 透過, 屈折, 干渉, ...

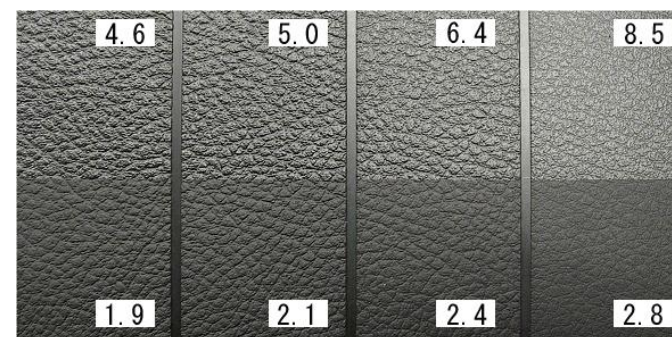
# 質感

- 計算機における「質感」の視覚情報の取り扱い
  - 入射光線に対する出射光線の応答関数と捉える
  - 反射光・散乱光・透過光から質感を考える



# 質感の定量化に向けて

- 産業界における「**質感定量化**」の重要性
    - 自動車の内装部品の高級感の定量評価
    - 製品の表面の傷の検査
    - 電化製品の高級感による差別化
- 光の伝播から定量化できないか？

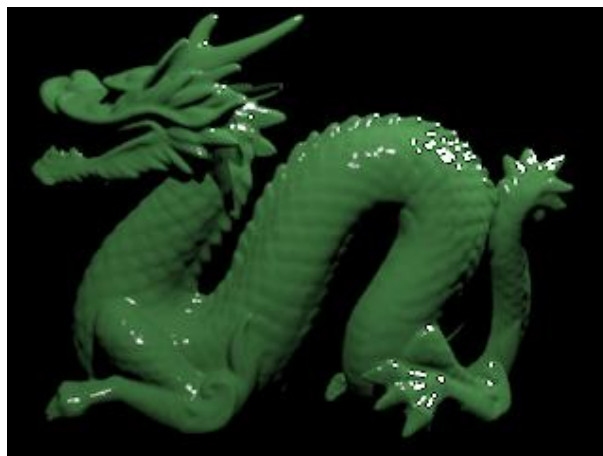


# 反射特性



# 反射特性の違い

- 同じ形状，同じ照明でも異なる見え方



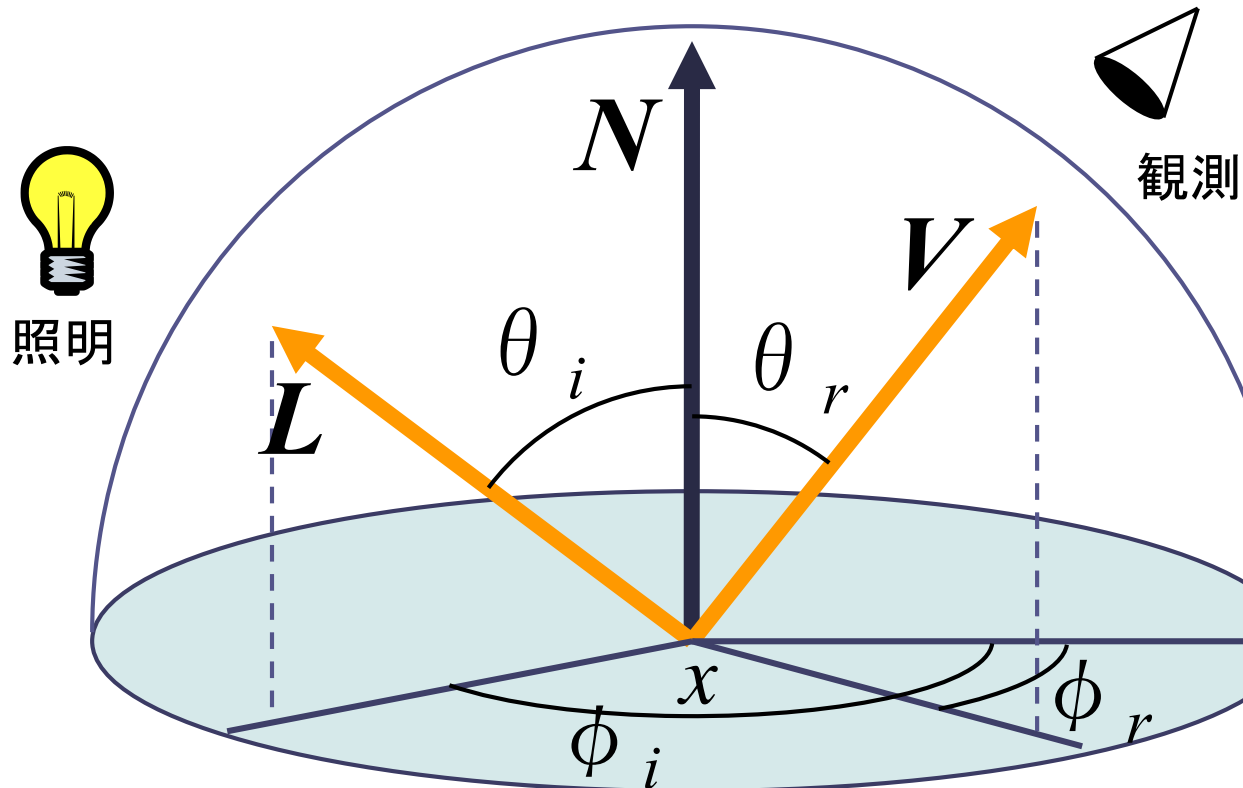
ざらざら

質感

つるつる

# 反射の表現方法

- ある点  $x$  に方向  $(\theta_i, \phi_i)$  から照明した光は, 方向  $(\theta_r, \phi_r)$  にどれだけの強さで反射するか？
- 照明方向と反射方向の**双方向**に依存する

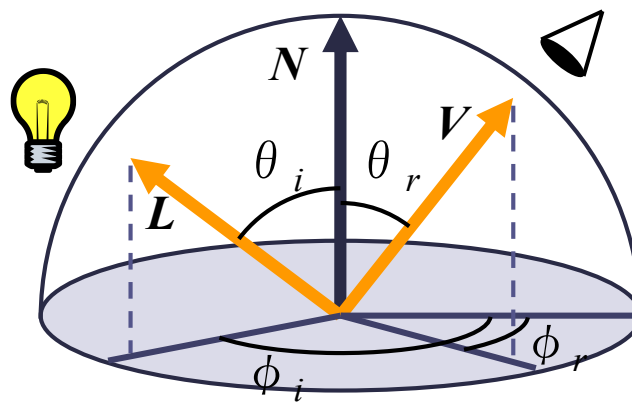




# 双方向反射率分布関数

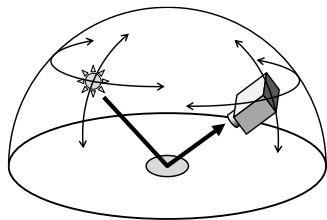
- BRDF (Bidirectional Reflection Distribution Function)
- 入射光照度 (イラディアンス) に対する出射光輝度 (ラディアンس) の比
- 通常は波長を省略 → R,G,Bの3チャンネルで定義

$$f_{BRDF}(x, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$$

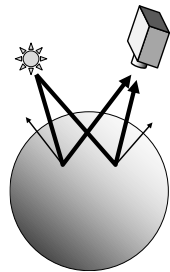


# BRDFサンプリング手法の分類

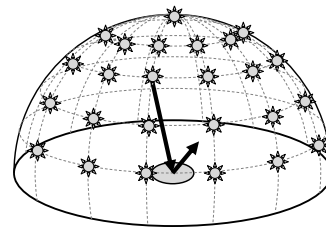
- (1) 光源とセンサを機械的に回転
- (2) 反射特性が一様な物体を利用
- (3) 光源とセンサを半球状に配置
- (4) 反射屈折光学系を工夫



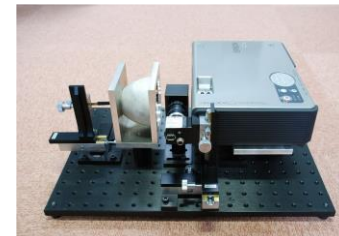
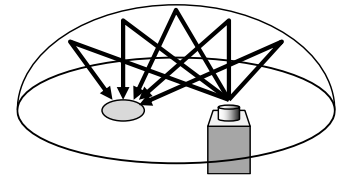
(1)



(2)



(3)



(4)

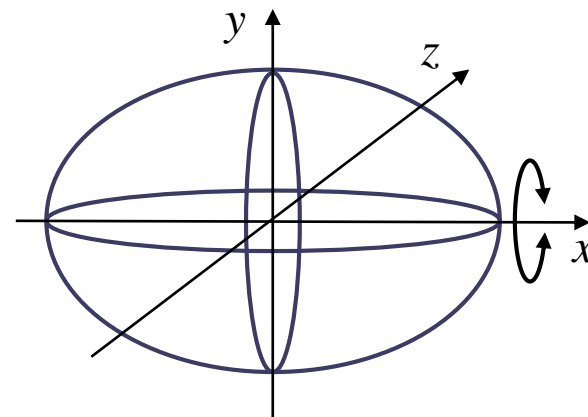
# 反射光の計測

角野皓平, 向川康博, 八木康史,  
“楕円鏡を用いた双方向反射率分布関数の高速計測”,  
電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J90-D, No.8, pp.1930-1937, Aug.2007.

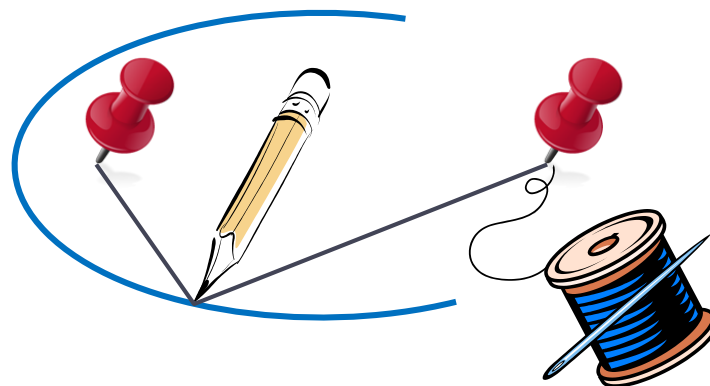
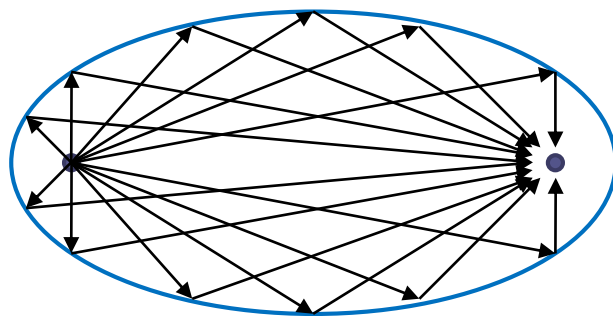
# 反射鏡の利用

## • 回転楕円体の特徴

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

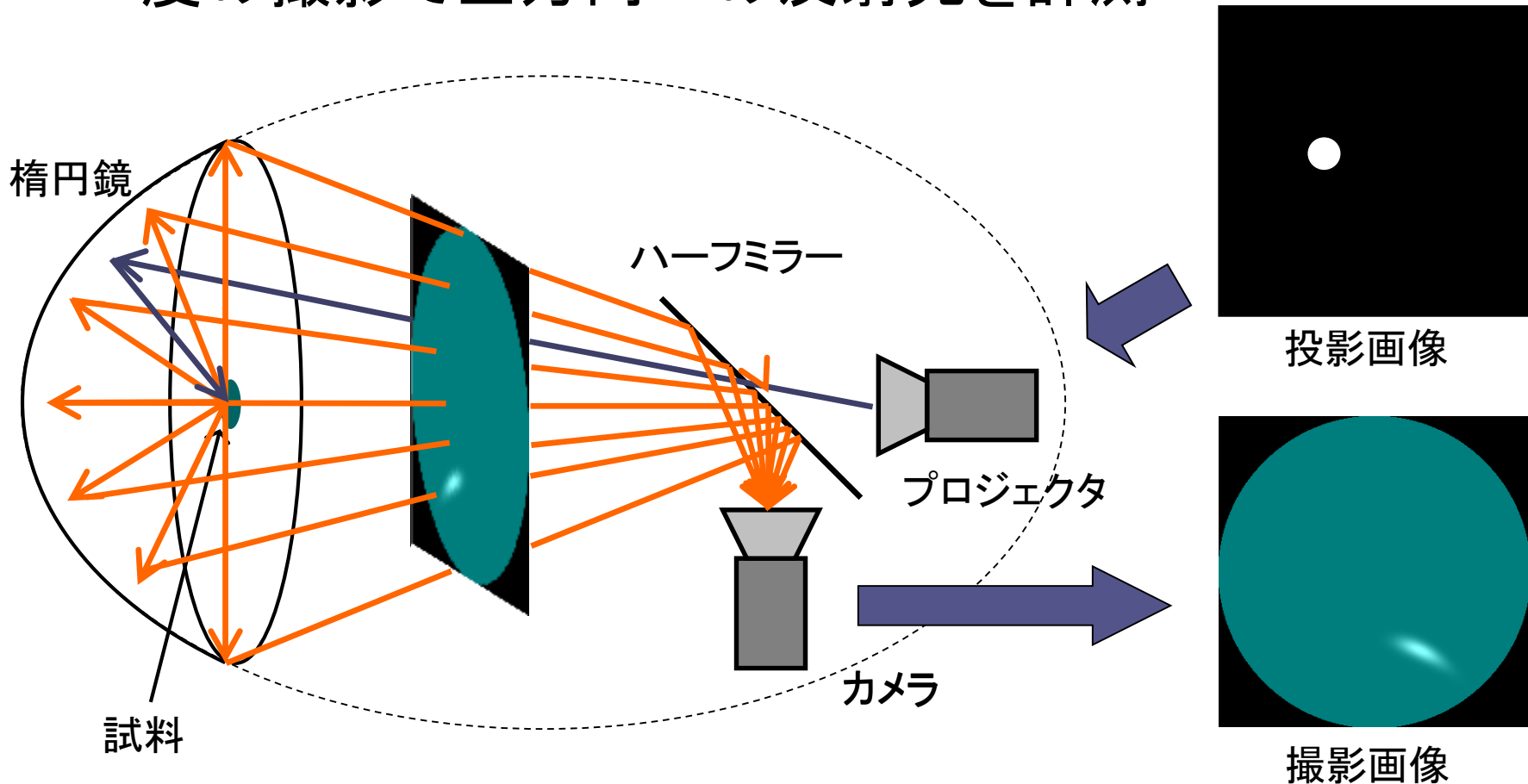


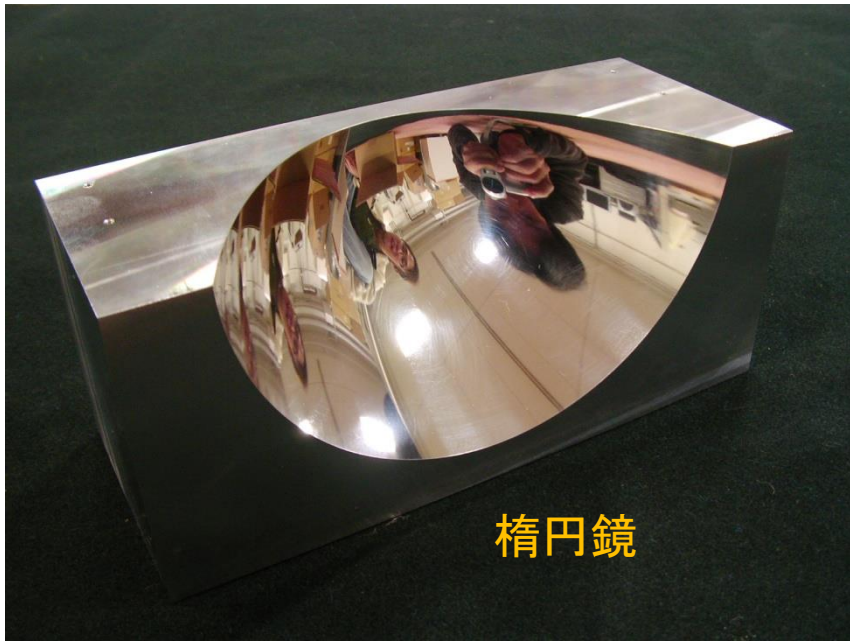
- 2つの焦点を持ち、一方の焦点を出た光線は内面で反射し、もう一方の焦点に集まる
- その総距離は一定



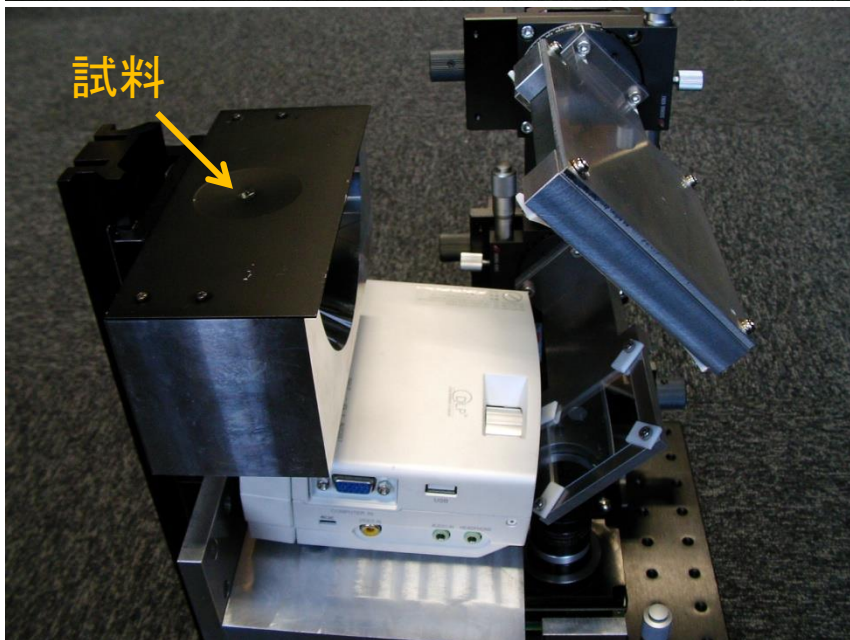
# 楕円鏡を用いた反射特性計測の原理

- 投影パターンを変えることにより照明方向を制御
- 一度の撮影で全方向への反射光を計測

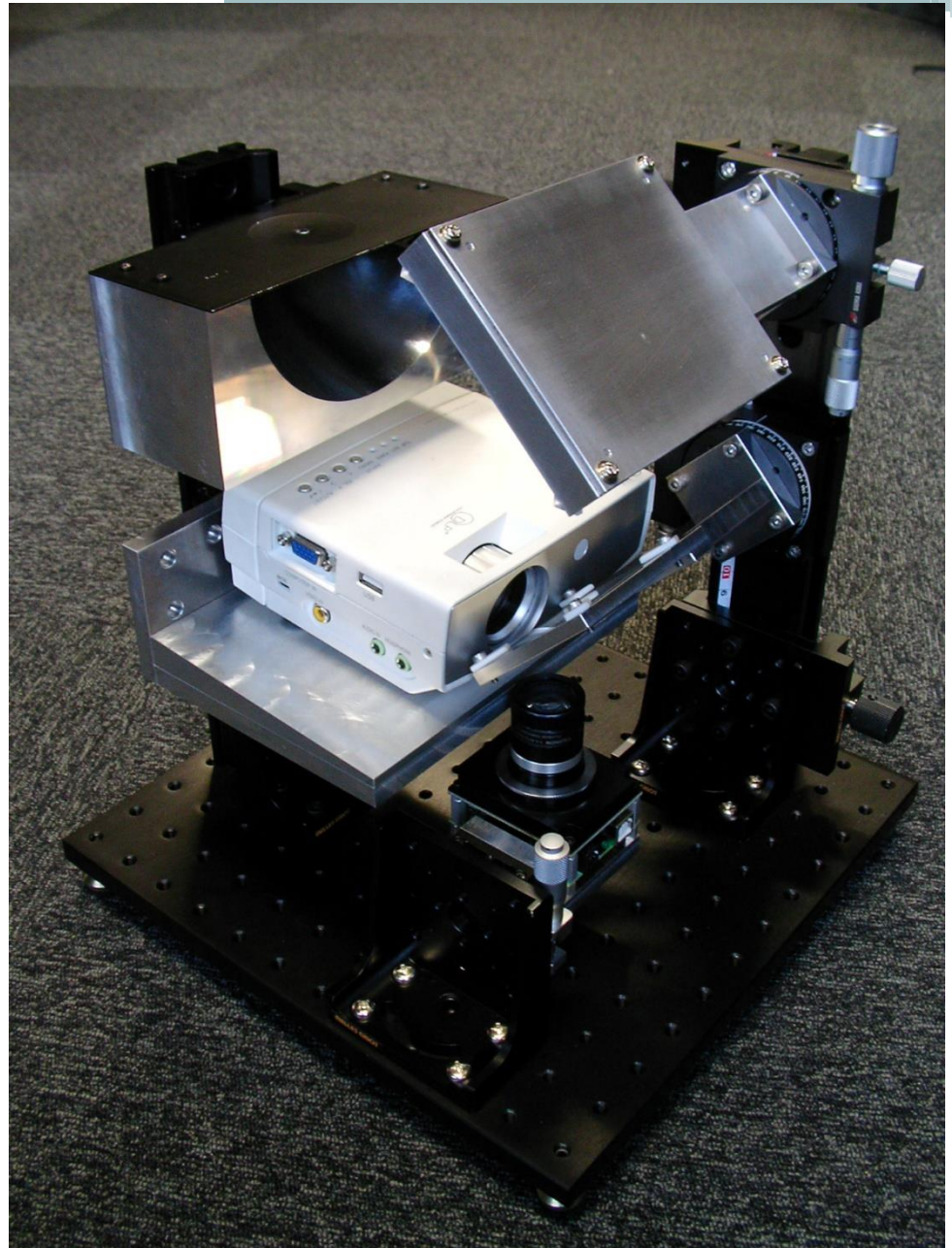




楕円鏡

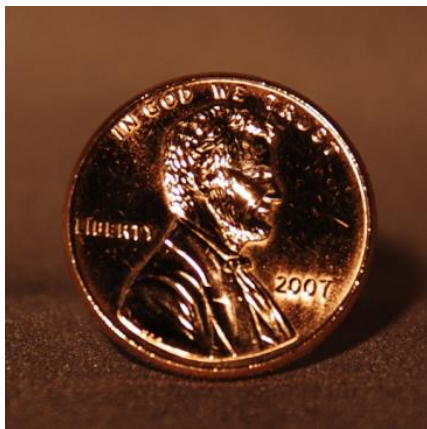


試料





# 反射特性の計測とCG応用



硬貨



計測した反射特性



Buddaの  
幾何形状





# 構造色の反射特性

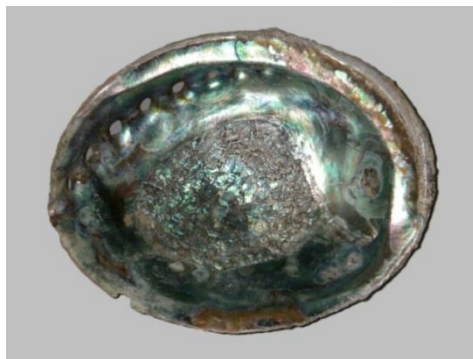
- モデル化の難しい構造色



多層膜干渉



構造色の例



メキシコ貝の内側



# メタリック塗装

池本祥, 向川康博, 松下康之, 八木康史,  
“微粒子を含む加飾フィルムの表面下構造解析”,  
画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2014), SS1-61, July, 2014.

池本祥, 向川康博, 松下康之, 久保尋之, 八木康史,  
“観測スケールを考慮したメタリック塗装の表面下法線分布解析”,  
情処研報 CVIM 199, Nov. 2015.

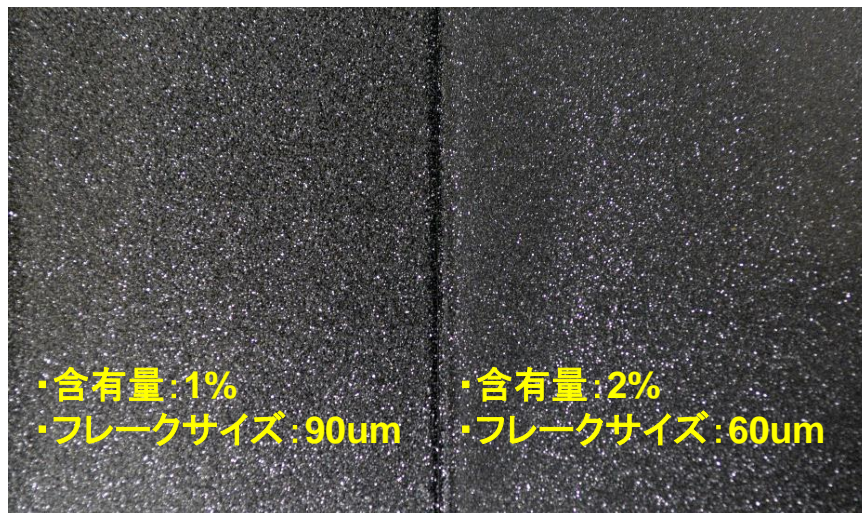
# 背景

## メタリック塗装を用いた「高級感」の表現

- 自動車: パールマイカ塗装
- 家電製品: 加飾フィルム

## 課題

- メタリック塗装の質感の定量化

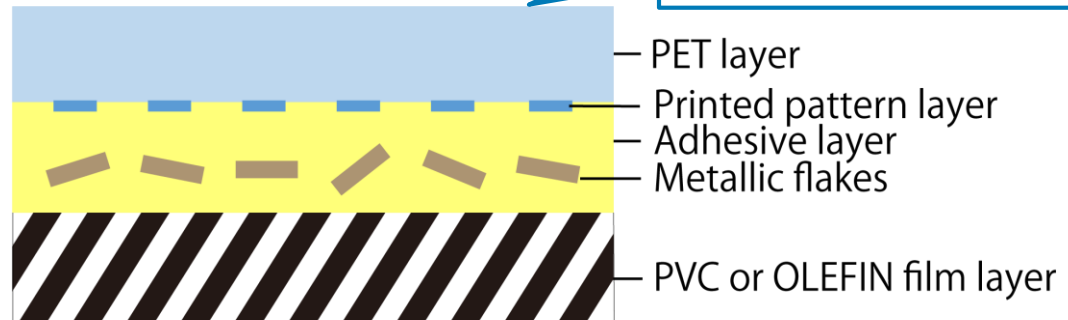


# メタリック塗装の特徴

加飾フィルム

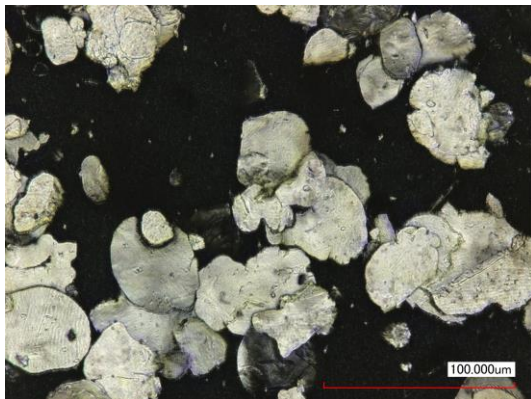


加飾フィルムの構造

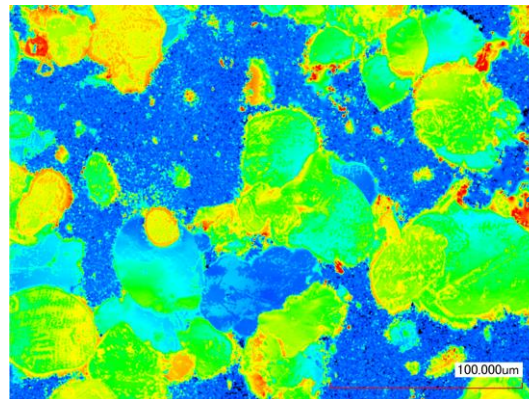


表面下に  
多数の金属フレーク

顕微鏡を用いた観測



観測画像



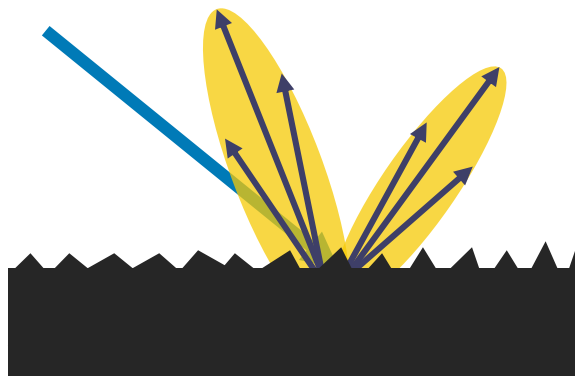
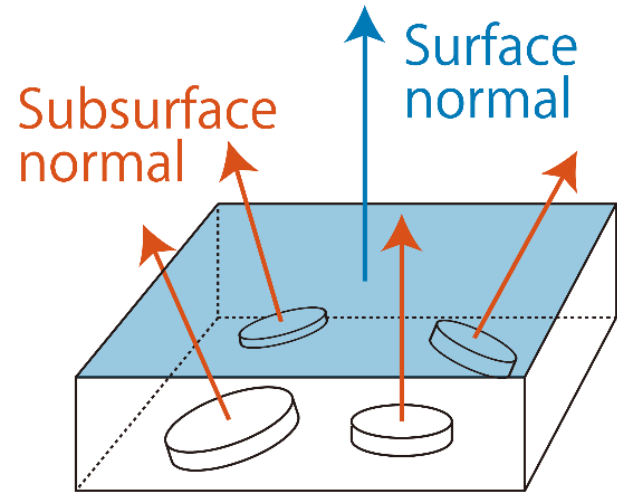
高さ情報

- フレークは異なる半径の円形
- 様々な角度に傾いている

# 多重法線構造

フレークによる表面下の法線を「**表面下法線**」と定義

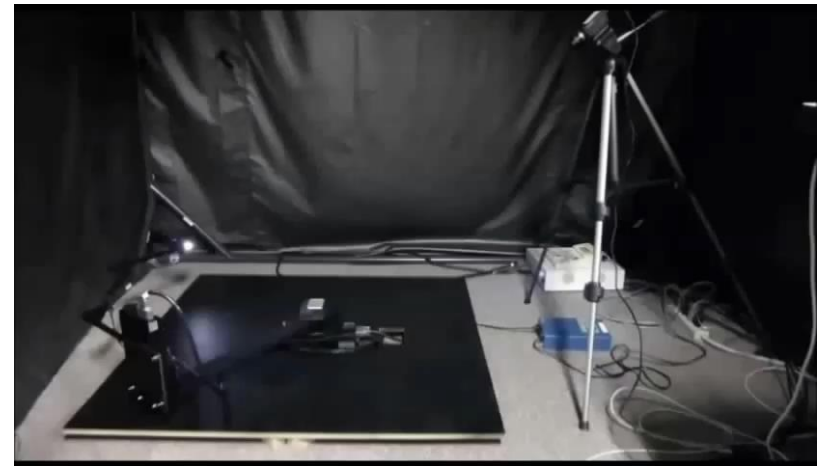
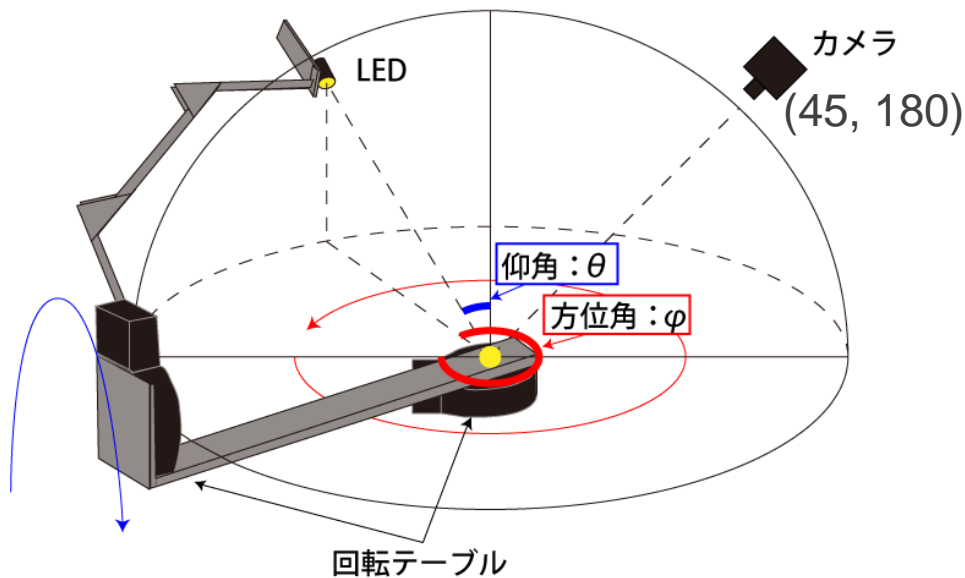
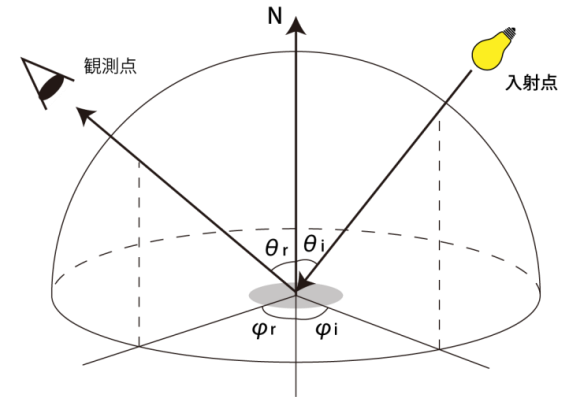
また、1画素に複数の法線が対応する構造を「**多重法線構造**」と定義



多重法線の影響で  
複数の反射ピークが存在

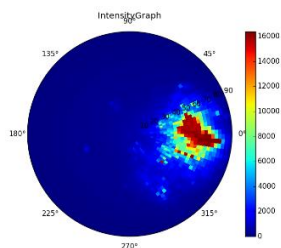
# 反射光の計測

- カメラを固定し，光源を2軸回転

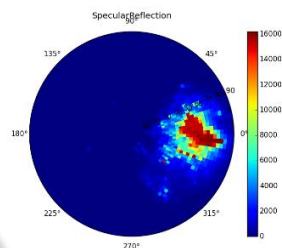


# 反射光の解析

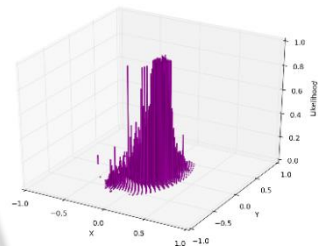
計測輝度値



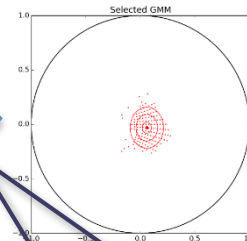
鏡面反射成分



法線尤度



法線分布

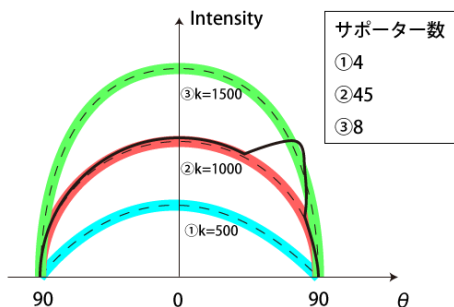


定量化

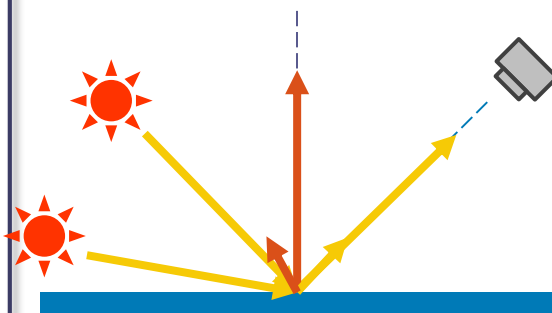
法線分布の  
統計量

## 拡散反射の分離

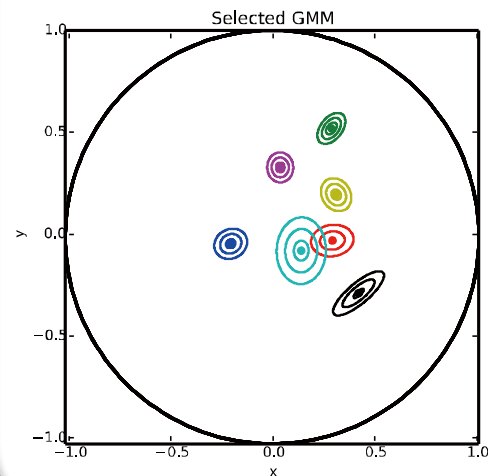
$$i_d = k \cos \theta$$



## 法線尤度の算出



## 混合ガウス分布近似

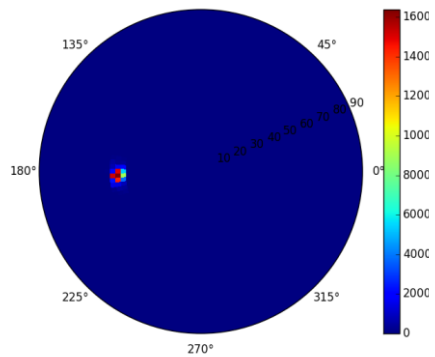


# 比較

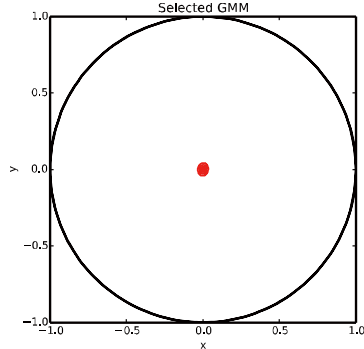
鏡



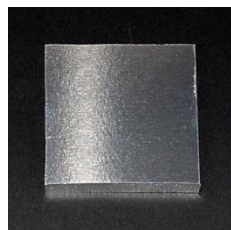
IntensityGraph



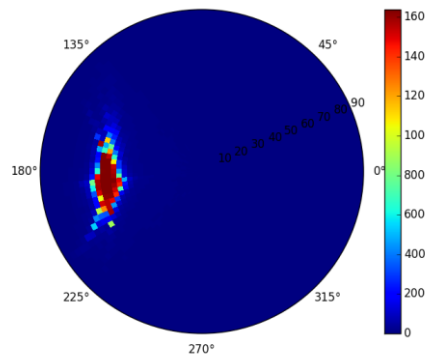
Selected GMM



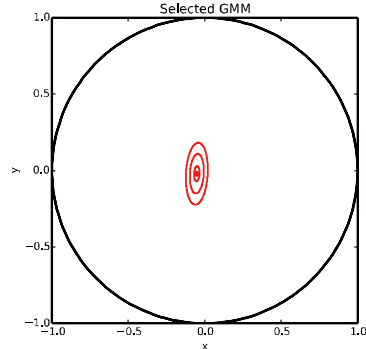
ヘアライン加工



IntensityGraph



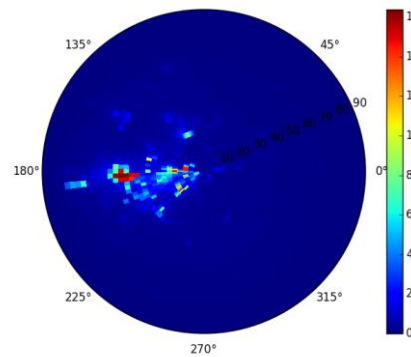
Selected GMM



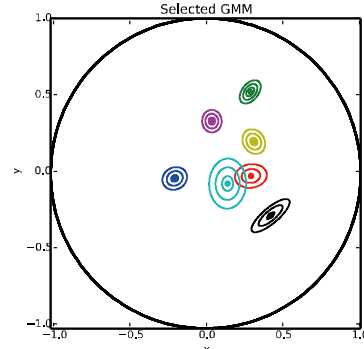
加飾フィルム1



IntensityGraph



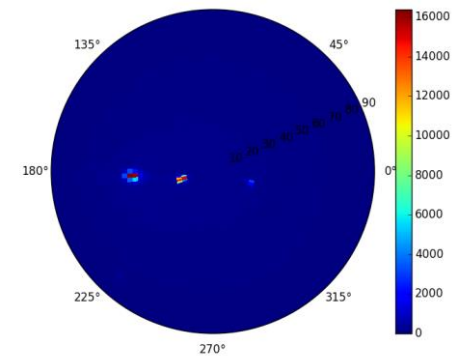
Selected GMM



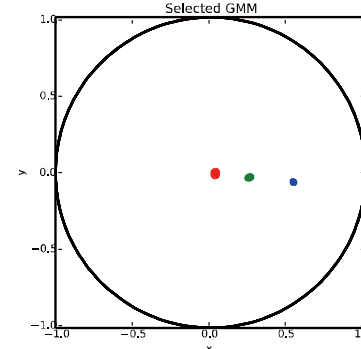
加飾フィルム2



IntensityGraph

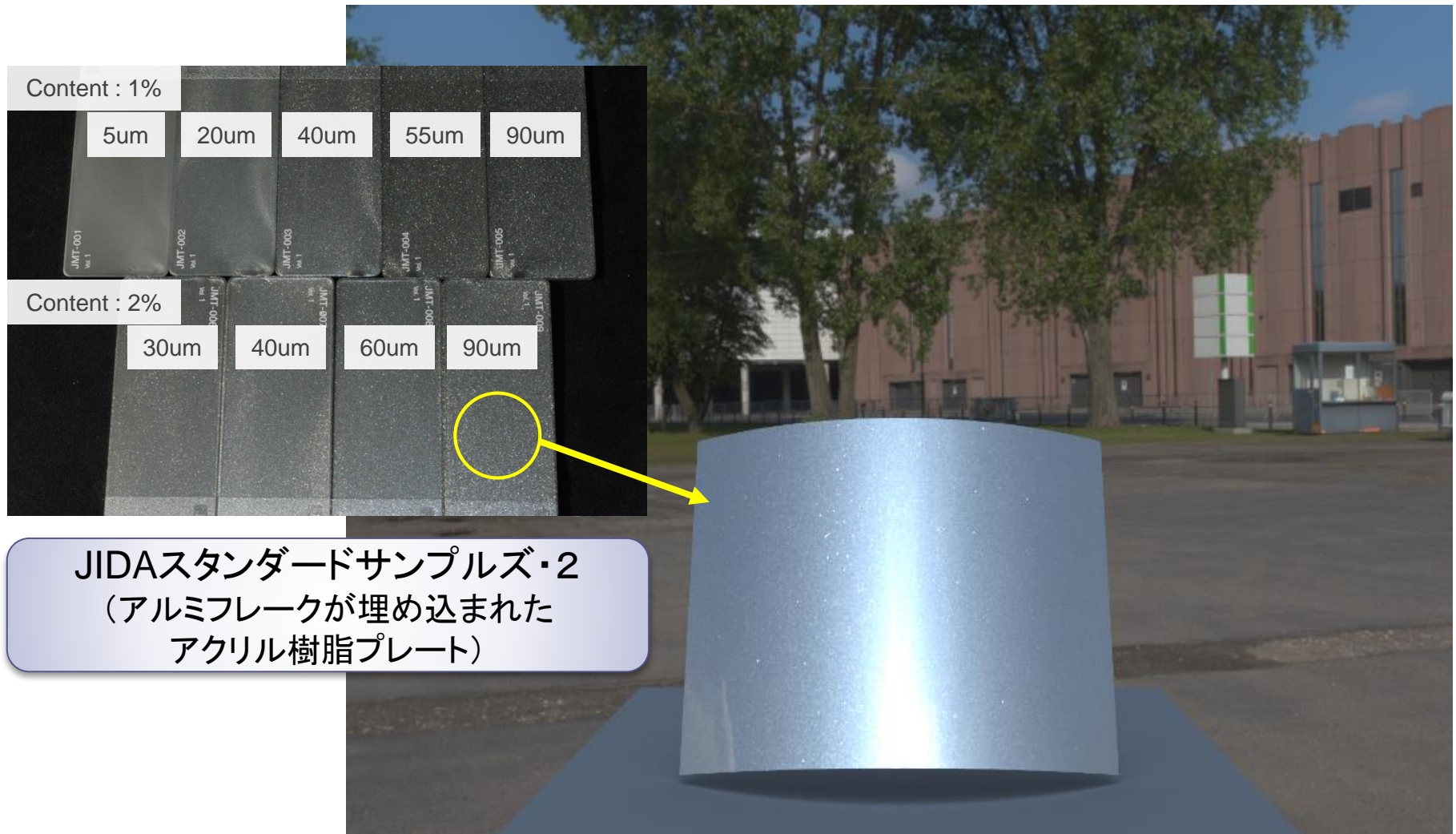


Selected GMM





# CGによる「キラキラ」の再現

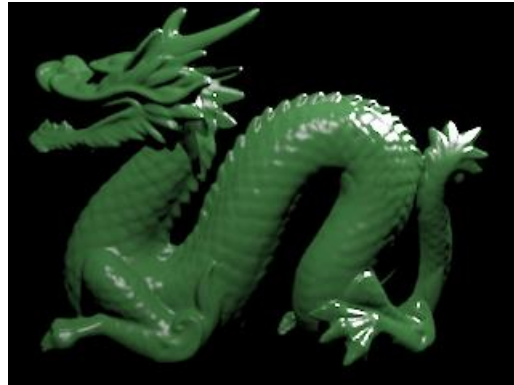


# 反射による質感表現の限界

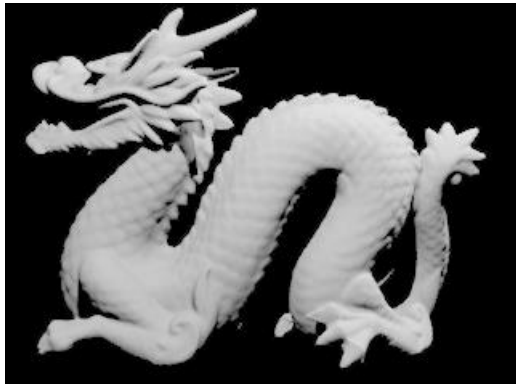
A decorative horizontal bar consisting of a solid teal line at the top, followed by a white line, and then three thin, parallel teal lines below it.

# 反射・散乱による見え方の違い

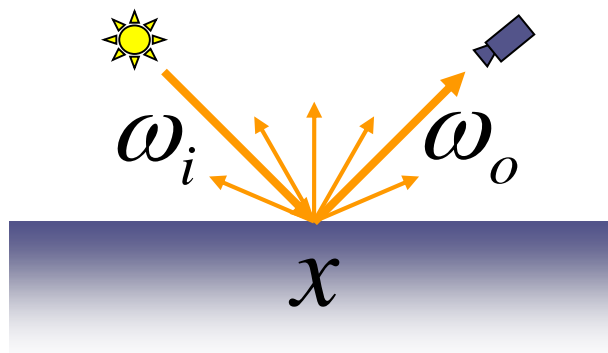
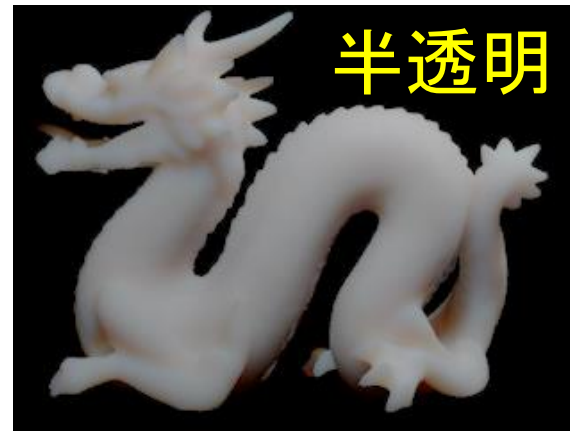
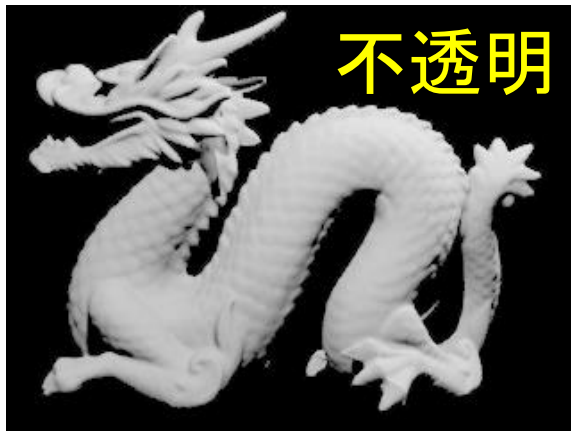
- 反射の違い(ざらざら, つるつる)



- 散乱の違い(不透明, 半透明)

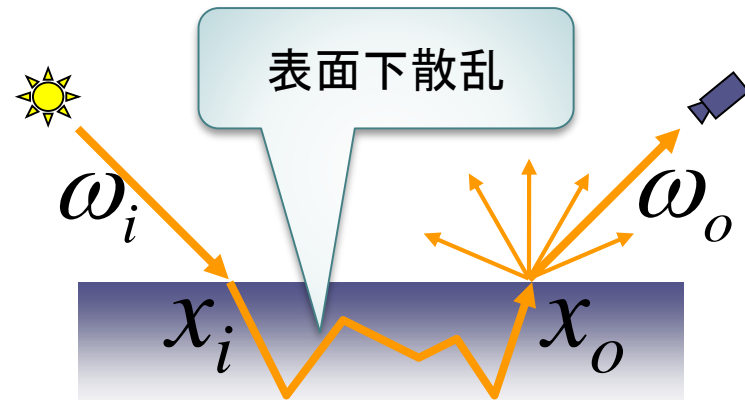


# 半透明物体で生じる表面下散乱



$$\text{BRDF: } F(x, \omega_i, \omega_o)$$

Bidirectional Reflectance  
Distribution Function



$$\text{BSSRDF: } S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o)$$

Bidirectional Scattering Surface  
Reflectance Distribution Function

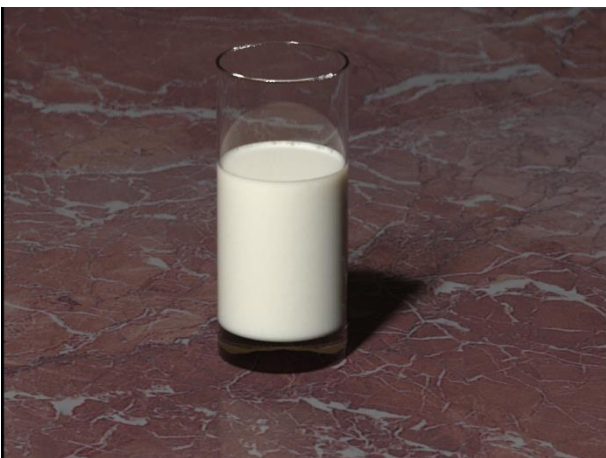
# ダイポールモデルによるレンダリング例

(Jensen et al. SIGGRAPH2001)

BRDF

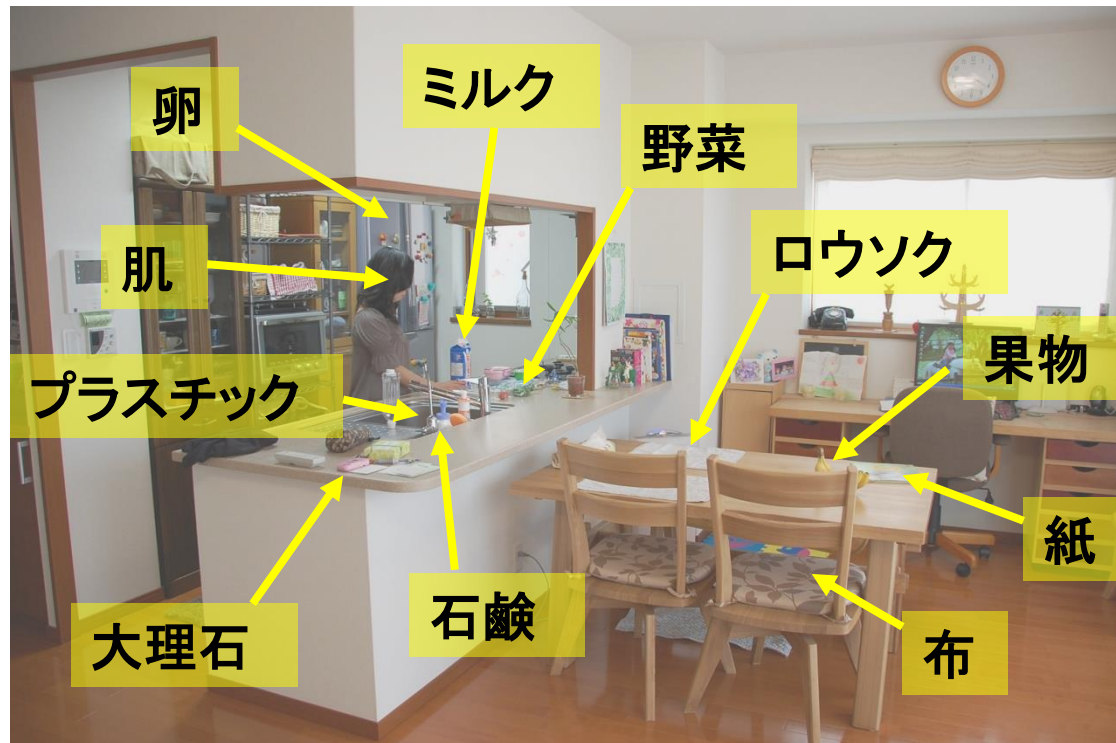


BSSRDF



# 半透明物体は特殊ではない

- 典型的な半透明物体
  - ミルク, 大理石, 肌
- 金属以外の物体は, 程度の差こそあれ半透明である



# CGにおける散乱光表現の重要性

- 写実的な皮膚の質感の表現
- 特に人間のレンダリングには必須



ジュラシックパーク(1993)



「Harry Potterと秘密の部屋」のDobby (2002)  
(物理的に正確な表面下散乱を計算した最初の映画)



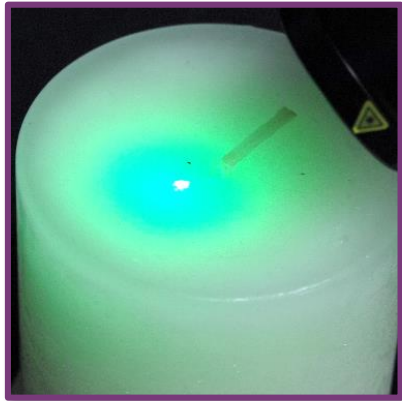
「ロードオブザリング」の  
Gollum (2002-2003)

# 反射光・散乱光の分解に基づく 材質推定

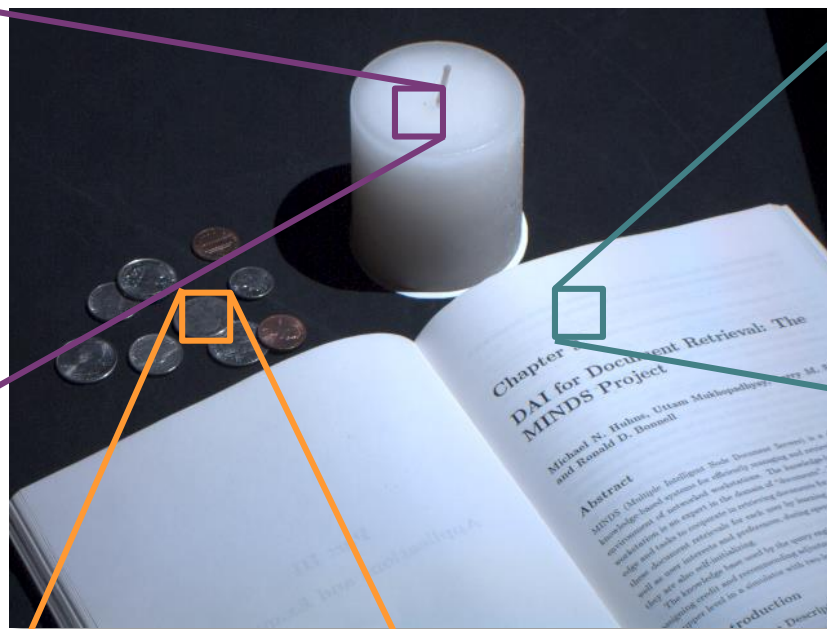
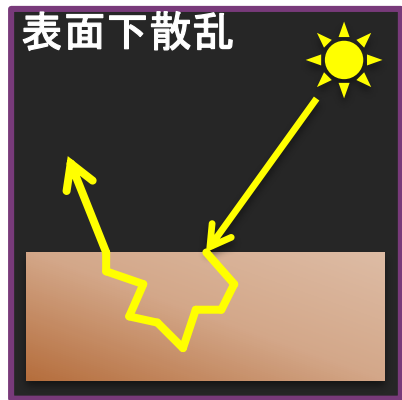
高谷剛志, 向川康博, 松下康之, 八木康史,  
“多重重み付け計測による反射・散乱光の分解”,  
画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011).



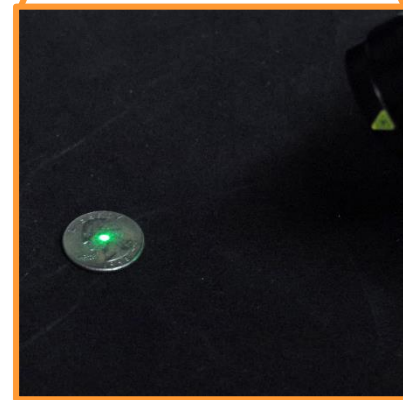
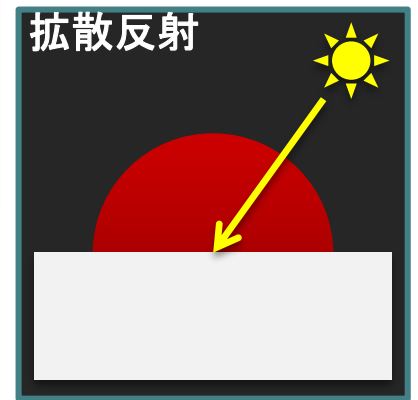
# シーン中に混在する様々な光学現象



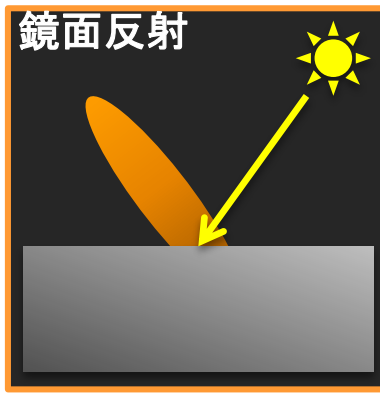
表面下散乱



拡散反射



鏡面反射



# 反射光・散乱光の分解

- 「多重重み付け計測」
  - 偏光解析・高周波照明などを組み合わせ、反射・散乱成分を分解



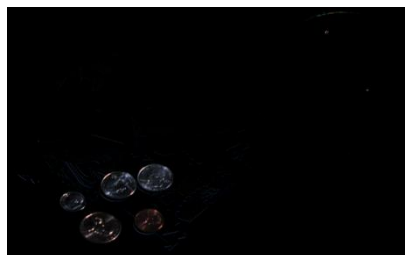
計測の様子



対象シーン



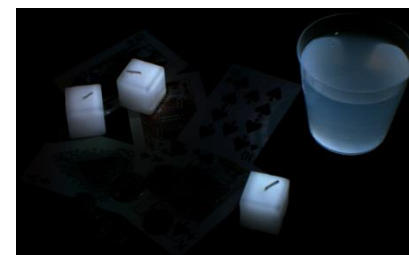
拡散反射



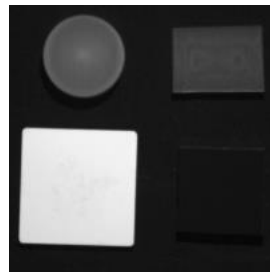
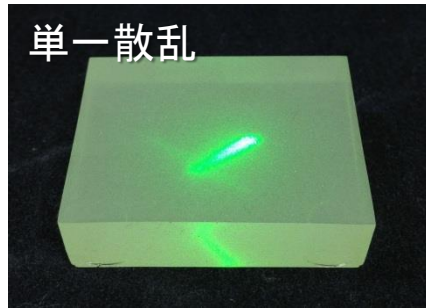
鏡面反射



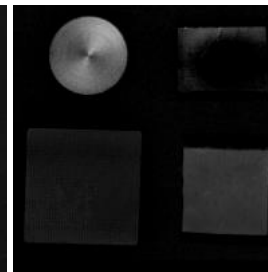
単一散乱



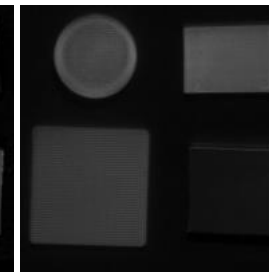
多重散乱(+相互反射)



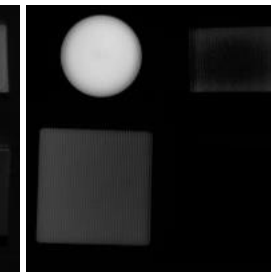
拡散反射



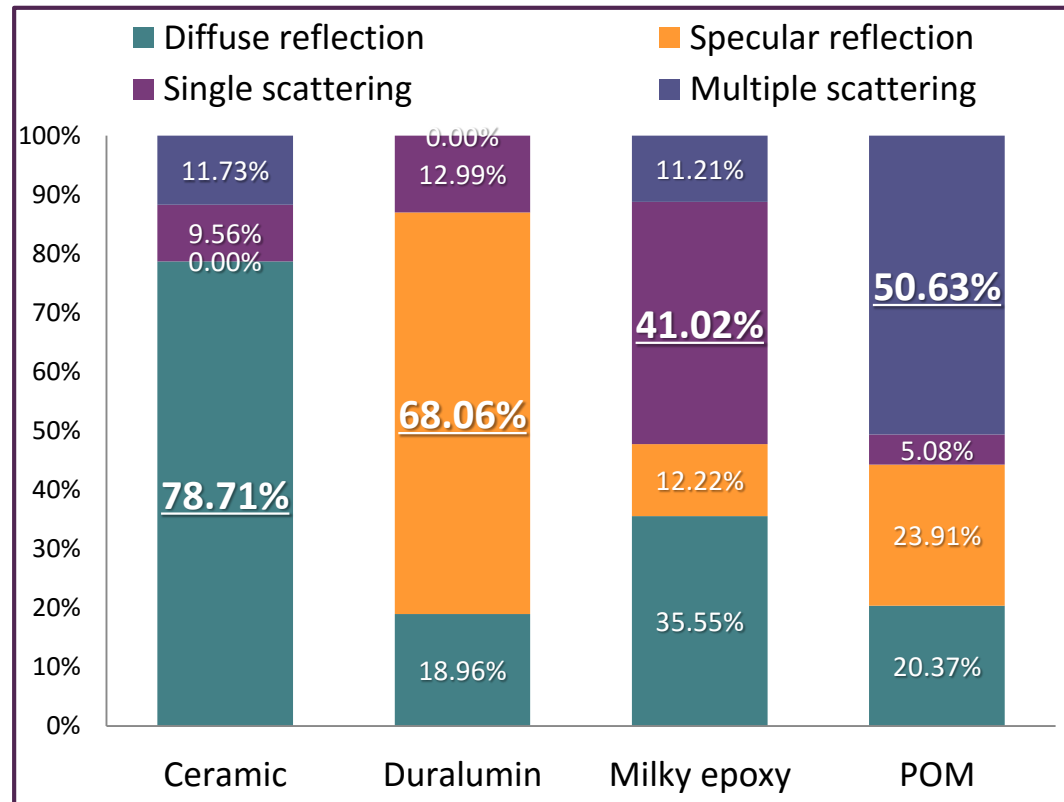
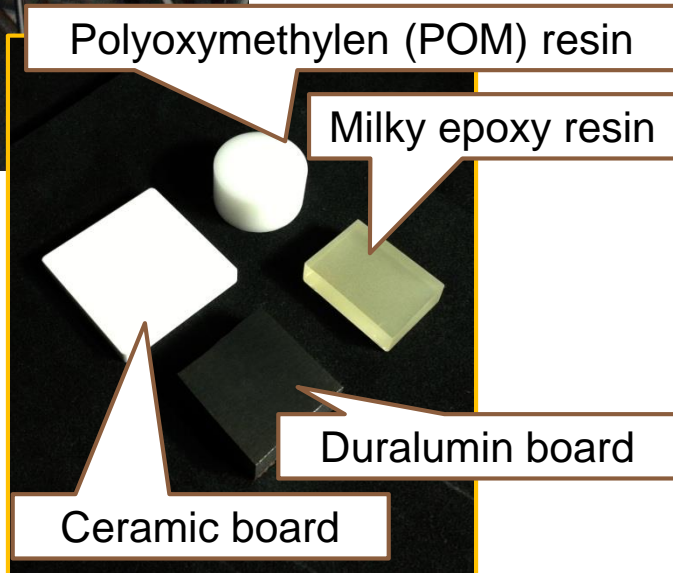
鏡面反射



単一散乱

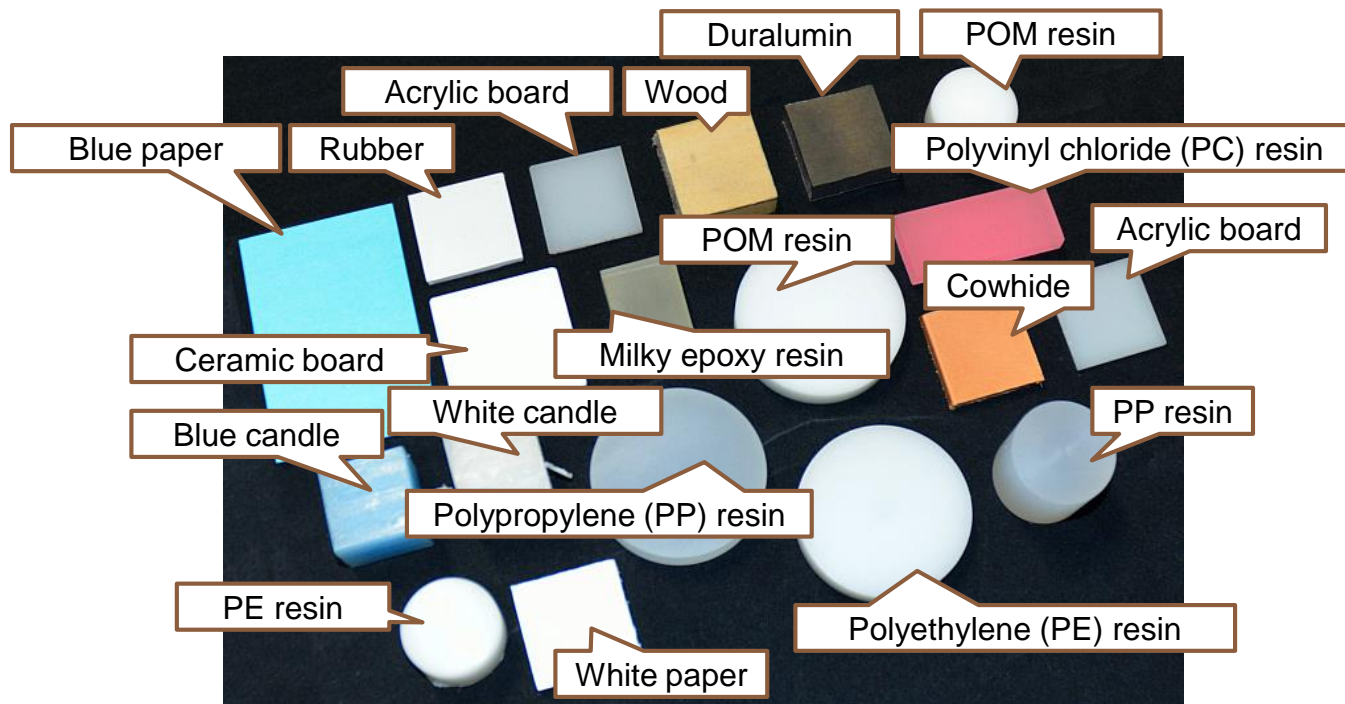


多重散乱



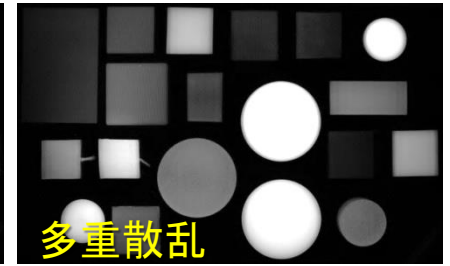
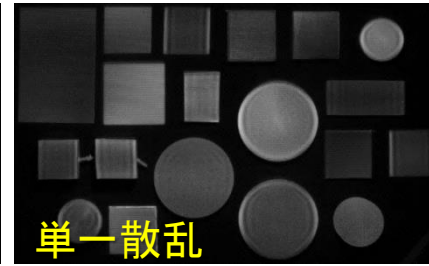
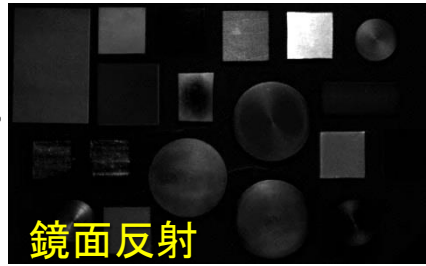
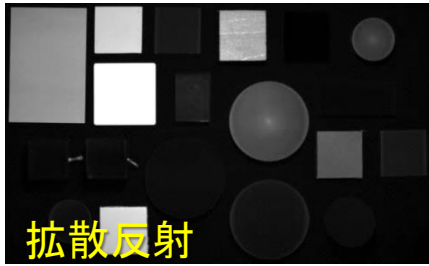
# 材質ごとの分類

- 4成分の比率に基づくセグメンテーション
  1. 各ピクセルごとに4成分を分解し, 4次元ベクトルとして表現
  2. ベクトルのノルムを正規化(4成分の強度ではなく比率)
  3. *k*-means セグメンテーション

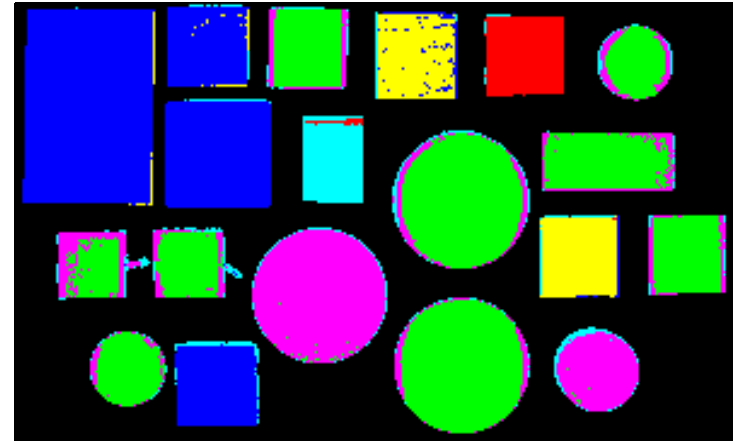


19 objects (**13 materials**)

# 領域分割の結果



Low opaqueness Metallic High opaqueness



High translucency Low translucency  
Mid translucency

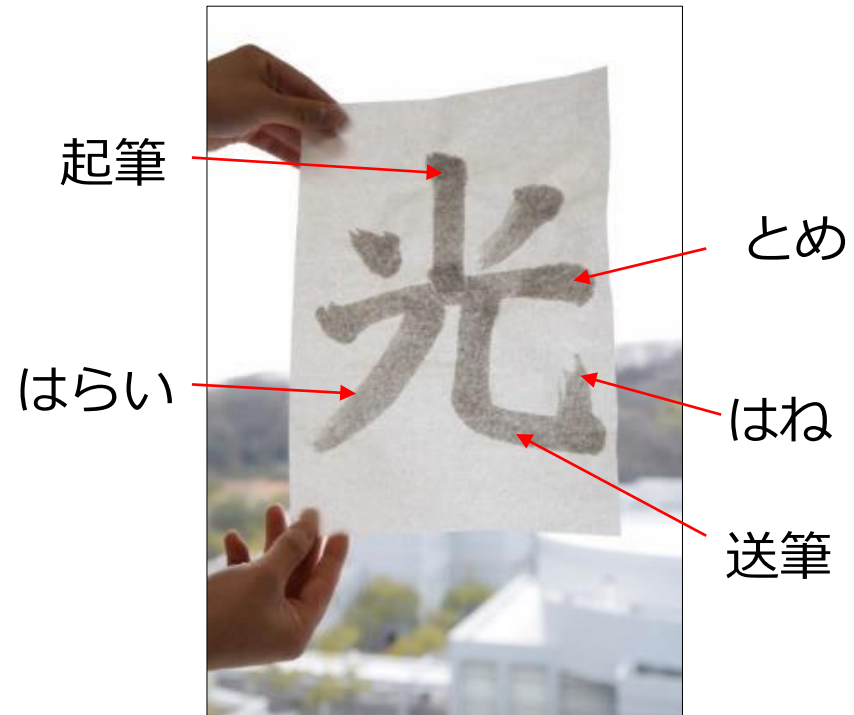
$k = 6$

# 書画の質感再現

浅田繁伸, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博,  
“書画の質感再現を目的とした光学的レプリカの試作”,  
情処研報 GCAD 159-5, June 2015.

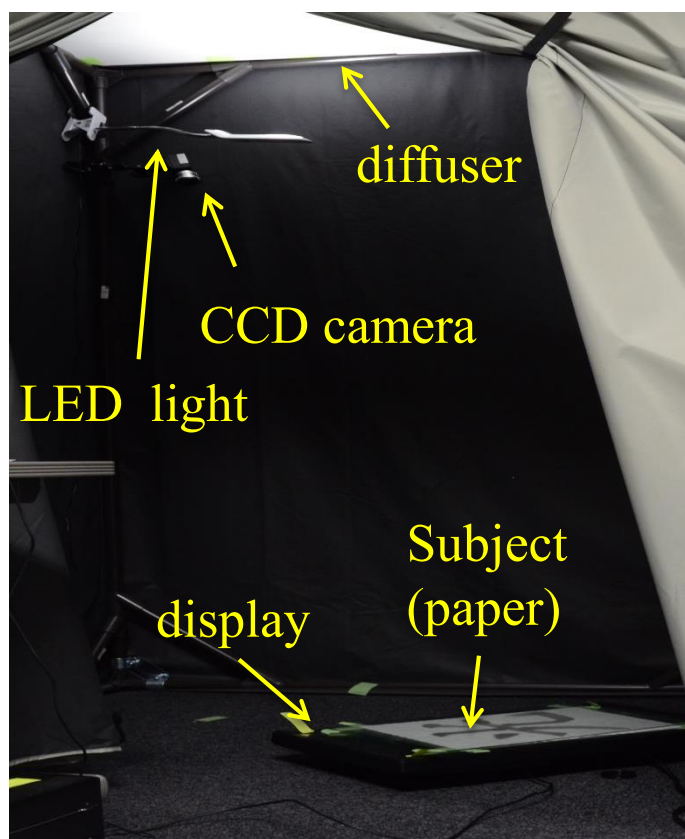
# 書画の質感

- 反射光と透過光に現れる書画特有の質感
  - 書画を書いた人物の筆使いの様子
  - 後世の書き加えの発見

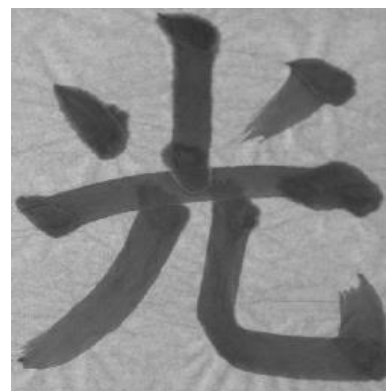


# 書画の反射率と透過率の計測

- 暗室で反射光と透過光を撮影



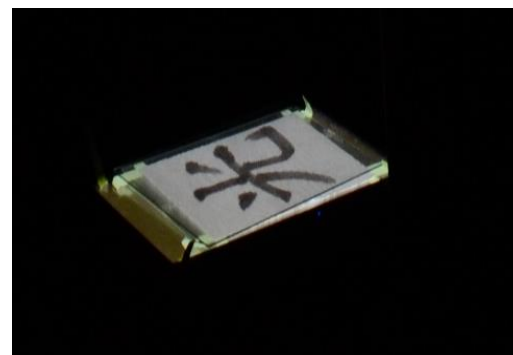
反射光の撮影



反射光



透過光



ディスプレイを光源として  
透過光を撮影



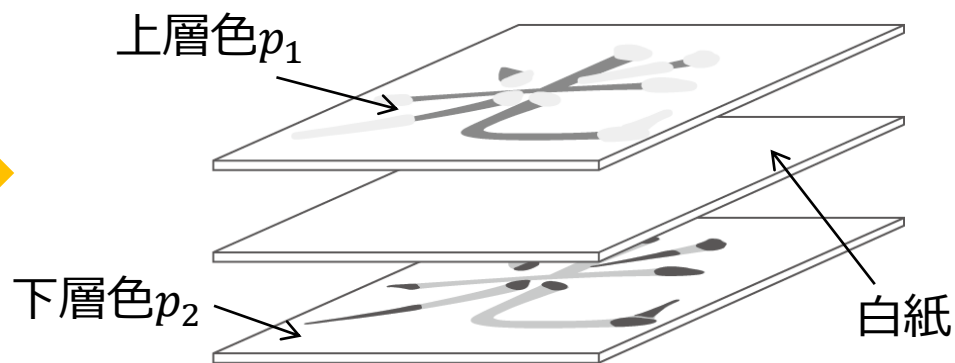
# 光学的レプリカの作成

- 異なる2枚の印刷物の間に白紙を挿入する3層構造
  - 上層色と下層色の組み合わせで、反射率と透過率を同時に再現

1つの濃淡値で、反射率と透過率を同時に制御することは難しい



1枚の印刷物



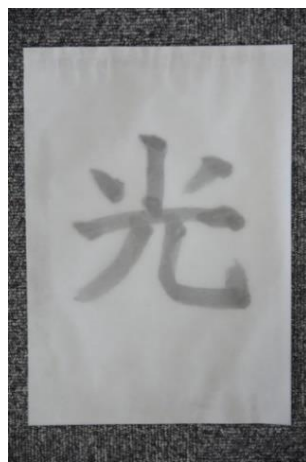
3層構造

# 光学レプリカの作成

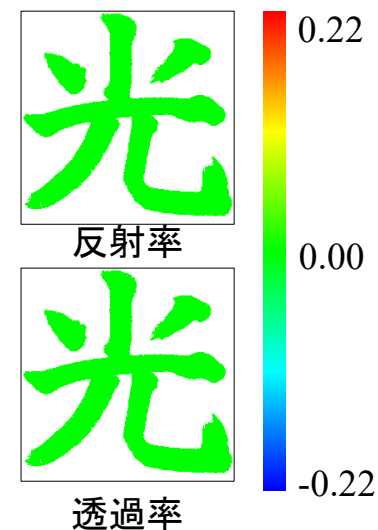
- 反射率と透過率を同時に再現
- 見るだけでなく手にとって観察することで質感を感じる新たなCGを提案



実物



光学的レプリカ



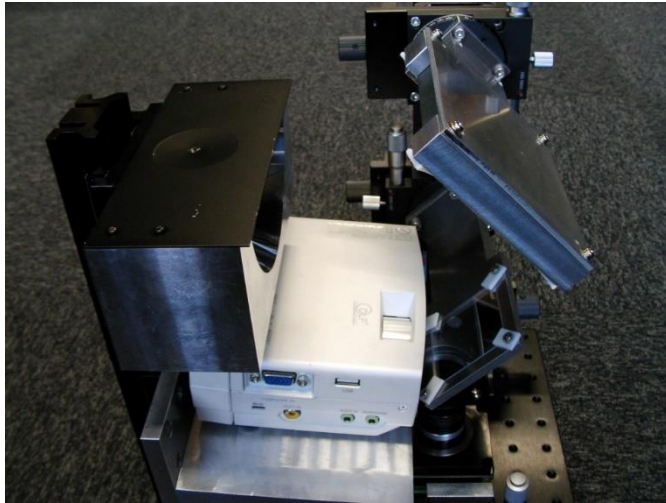
誤差分布

# 質感計測のまとめ

- 質感の計測
  - 画像の撮影ではなく、入射光線に対する出射光線の応答関数を詳細に計測
- 質感の定量化
  - モデルのパラメータ推定 (粗さ係数, 吸収係数, 散乱係数. . . )
  - 拡散反射・鏡面反射・散乱光・透過光等の比率
- 定量化の検証
  - CGやレプリカ作成による比較



# 質感の計測・解析

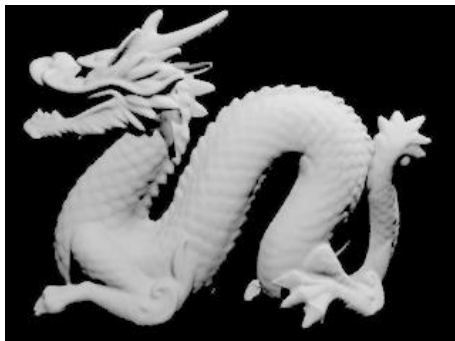


反射特性の解析



反射光と透過光

反射特性の計測と提示



反射光と散乱光



反射光と散乱光の分解  
材質の推定