

いろいろのいろいろ

(色は存在するもの？それとも感じるもの？)

答=> Feeling (感じるもの)

新潟県工業技術総合研究所
素材応用技術支援センター長
久保田 順一

我思う、ゆえに我あり Je pense, donc je suis



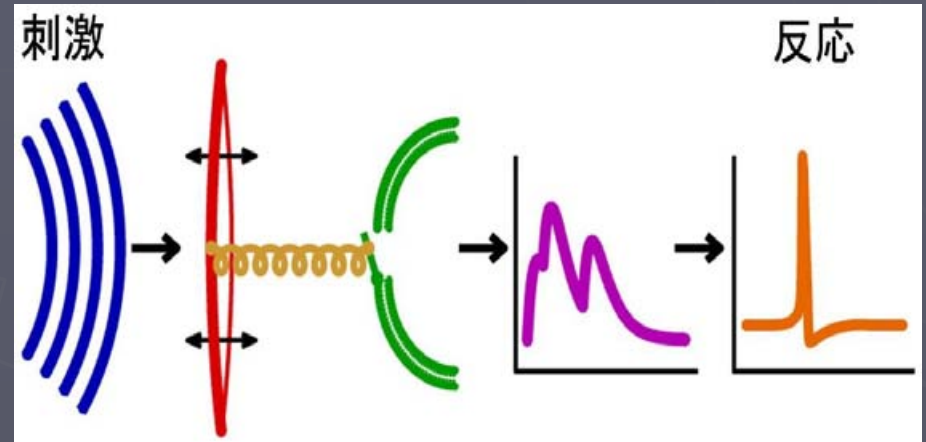
仏: René Descartes, 1596年3月31日 - 1650年2月11日

“自分はなぜここにあるのか”と考える事自体が自分の存在証明であるとする命題

心理的物理量

思うこと(知覚)で存在が定義

- ▶ 音→物体の振動が
空気などの振動(音波)
として伝わって起す聴覚
空気などの媒体の粗密波



- ▶ 暑さ寒さ→物質を構成する分子運動エネルギーの統計値。人はある温度範囲内でしか生存できないため、温度を暑さ寒さという知覚量に変換し直している。

芸術と心理物理量

- ▶ 芸術→表現者あるいは表現物(知覚対象物)と、鑑賞者とが相互に作用し合うことなどで、精神的・感覚的な変動(知覚)を得るもの。
- ▶ 芸術：美術、文芸、音楽、演劇など。→視覚と聴覚だけ！
- ▶ 近代まで芸術は、Techne(ギリシャ), Art(ラテン)という人工物という意味で、「技術」あるいは「よい技術、美しい技術」という第二義的概念であった。
- ▶ Question:料理(味)は芸術に成り得ない訳は？

視覚

- ▶ 視覚(しかく)とは、光の中で400nm～780nmの波長域にある可視光(光量子, Photon)を物理的入力とし、大脳皮質においてこの物理的入力を処理した結果に現れる感覚(心理的物理量のこと)。
- ▶ 視覚によって、外界にある物体の色、形、運動、テクスチャ、奥行きなどについての情報、物体のカテゴリーについての情報、物体の位置関係のような外界の空間的な情報などが得られる。

液晶とプラズマ,ELの色の違い

▶ 物体色

光源の照明下にある物体からの反射光(または透過光)によってもたらされる色知覚



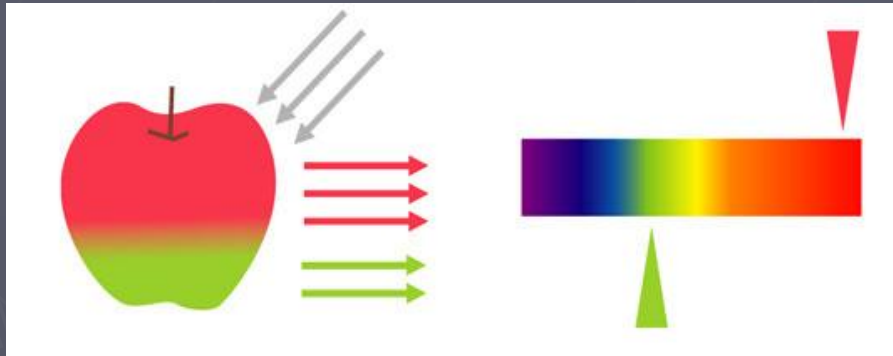
▶ 光源色

光源からの直接光によってもたらされる色知覚

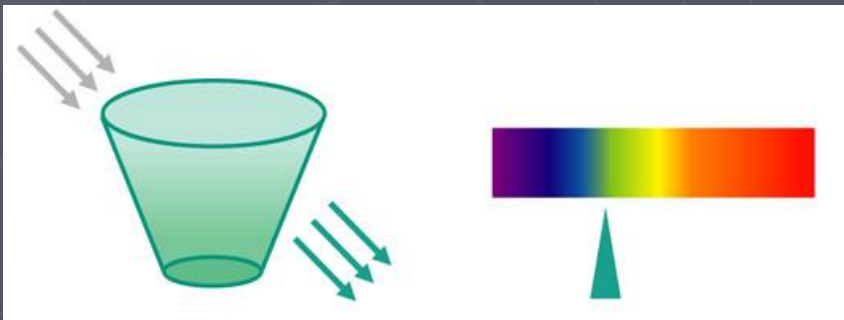




光源色 = $S(\lambda)$
S: 強度 λ : 波長



物体色 (反射)
= $S(\lambda) * R(\lambda)$
R: 反射率



物体色 (透過)
= $S(\lambda) * T(\lambda)$
T: 透過率

色はどのようにして知覚される？

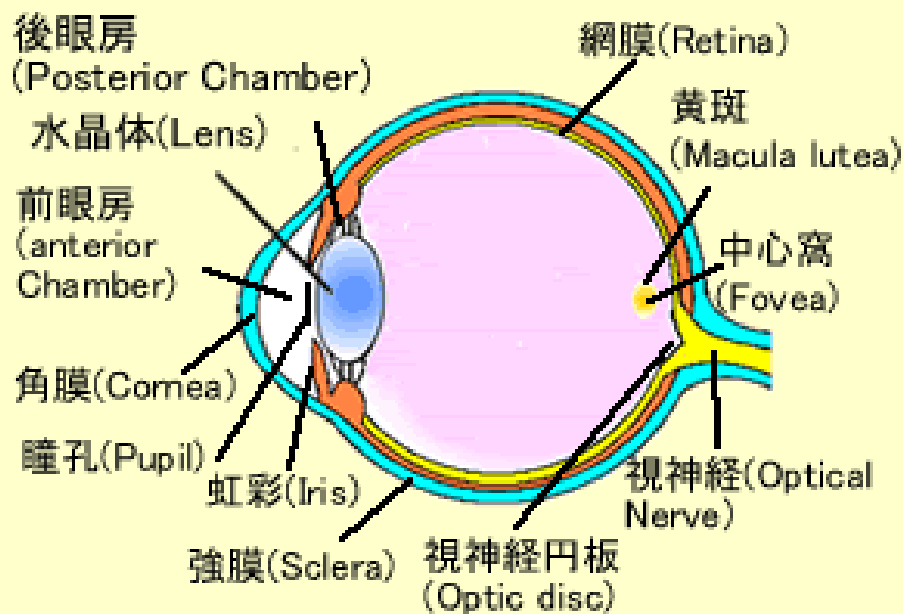
▶ 知覚(脳によって認知される感覚)

▶ 眼(入力段)

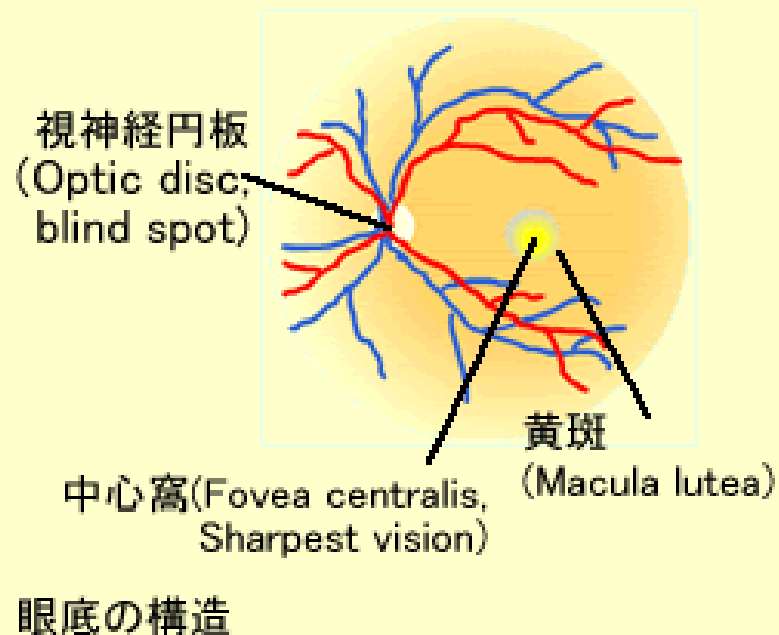
→ 大脳(情報処理)

→ 知覚(感覚)

眼球は光の分別型入力装置



眼球の断面図

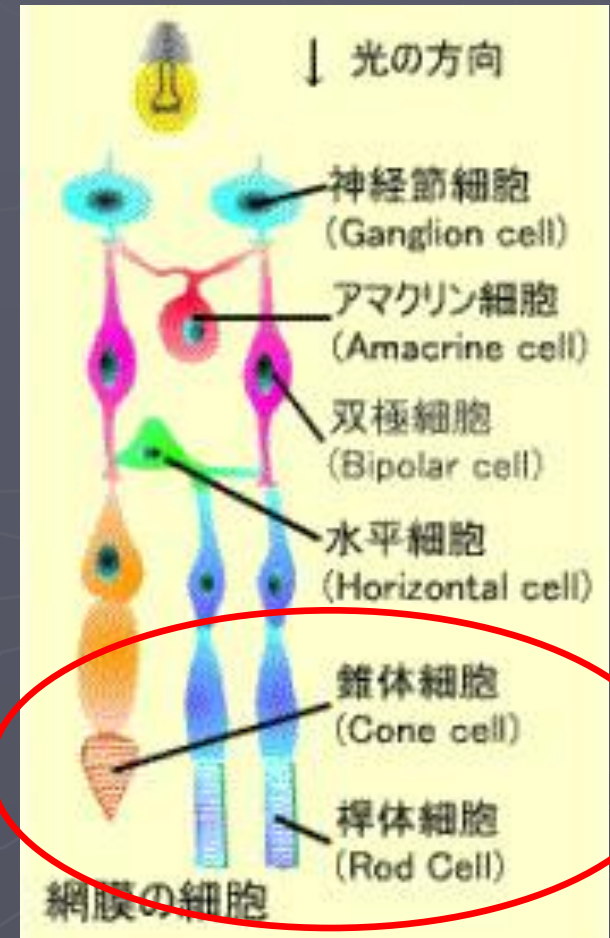
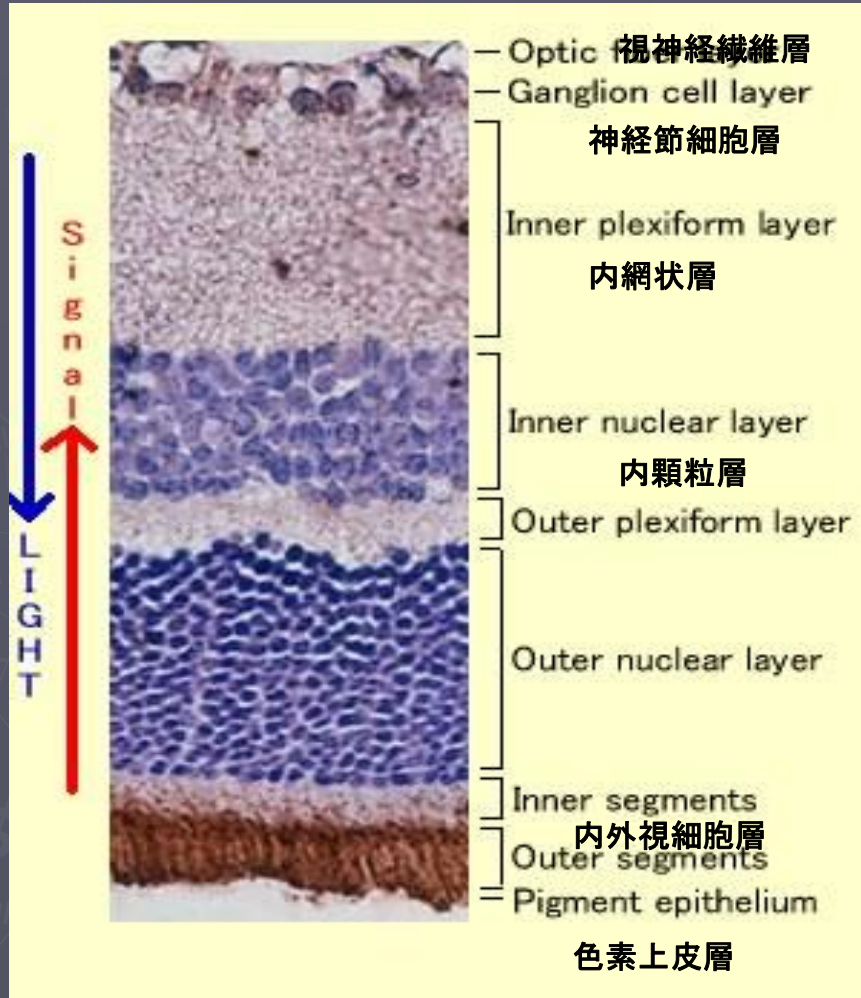


眼底の構造

- ▶ 網膜には明暗を認識する桿体(ロッド)細胞(1.2~1.4億)と色を認識する錐体(コーン)細胞(500~600万)がある。
- ▶ 明暗に敏感な桿体細胞は1光子(Photon)でも興奮しますが、錐体細胞は100光子以上が必要です。
- ▶ 神経節細胞は100万、視神経繊維の数は120万程度。
- ▶ 複数の視細胞が1つの視神経繊維に結合し、シグナルが統合されている。

網膜における受光と電気信号伝達

- ① 光は視神経繊維層から浸入し
- ② 網膜最下層の視細胞(錐体&桿体)層で電気信号に変換
- ③ 電気信号は逆のルートで視神経に伝達され、脳へ伝達される。
- ④ ③の課程の中で横方向との信号接合が行われる。

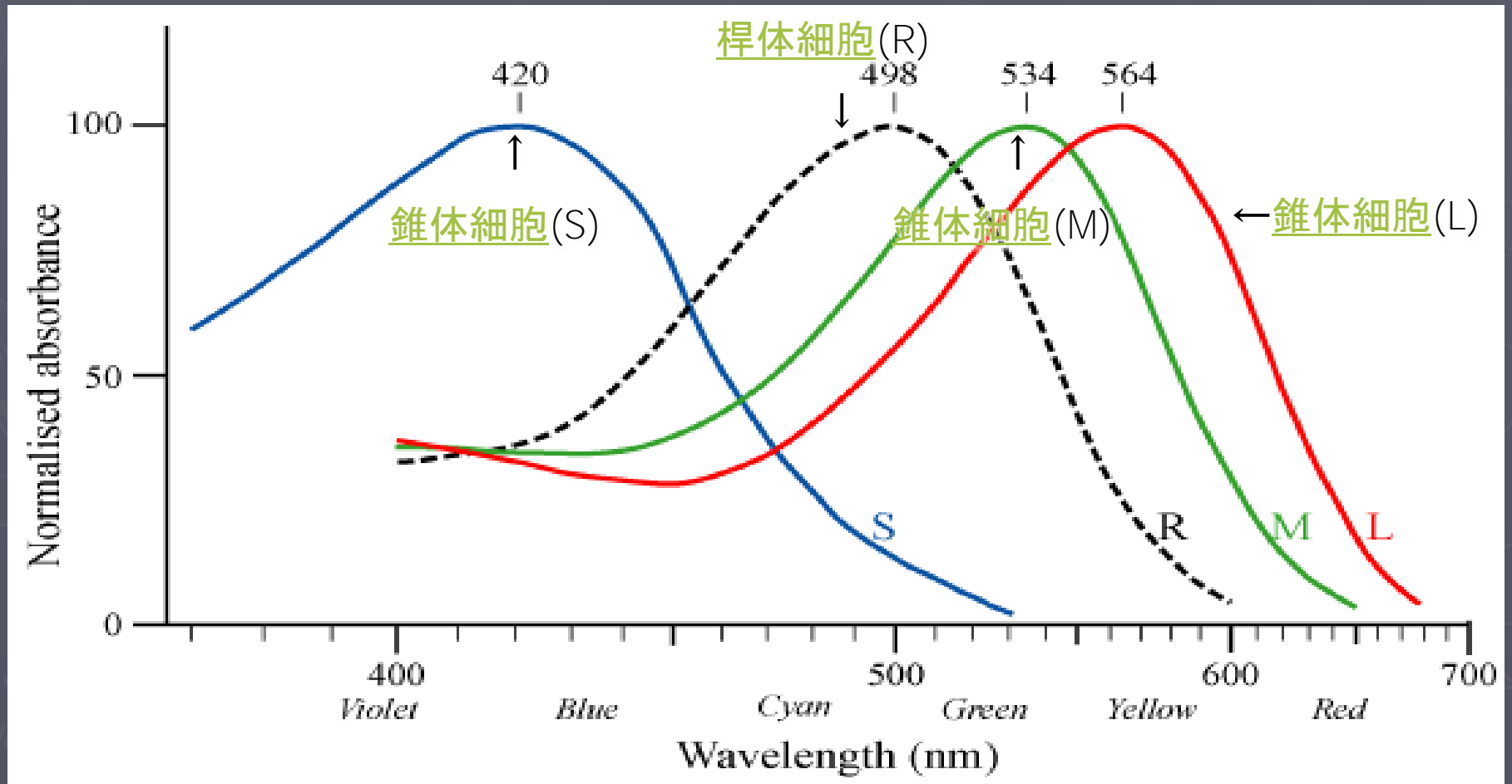


受光感度→次ページ

3色型色覚(ヒト)

錐体細胞(S,M,L)と桿体細胞(R)の感度

(細胞が含む視物質の吸収スペクトル)



網膜における受光細胞

- ▶ **錐体細胞**(S,M,L)は、網膜の中心部に多く分布しており、色は視野中心部で認識精度が高い。
- ▶ **桿体細胞**(R)は錐体細胞の外辺部に多く分布しており、明るさは、視野の外辺部で認識される。
- ▶ 錐体細胞は、感度が低いため暗くなると働かなくなり、桿体細胞が暗視野の主体となる。
- ▶ 桿体細胞は、視野中心部の分布が少ないので、暗闇では、視野の中心部感度が低下する。

大脳に伝えられる情報

- ▶ 大脳には、錐体細胞により特定の波長が吸収され（カット）された情報が色の原刺激として、杆体細胞からは明暗原刺激としてそれぞれ伝えられます。

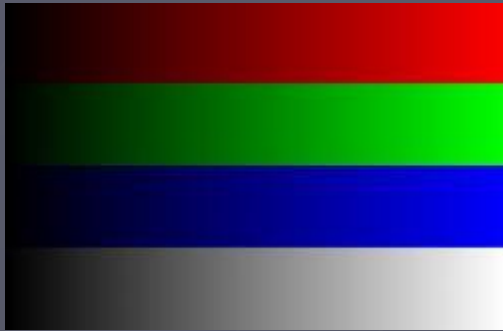
（差分信号・和信号により細胞数と神経繊維数の差を埋めています）

- ▶ 色覚異常は、錐体細胞の異常によって引き起こされます。

- ▶ 錐体細胞の異常は、先天的なものによるほか加齢によっても引き起こされます。

色覚異常

X染色体異常、XY遺伝子型の♂に多い (1/20:1/500)



正常色覚



第三色覚異常
Y-B系 B×



第一色覚異常
R-G系 R×



第二色覚異常
R-G系 G×

生物と色覚

- ▶ 人・類人猿→3色型色覚
- ▶ 古代爬虫類→4色型色覚 (人間女性の2-3%)
- ▶ 偶蹄類(馬)→2色型色覚
- ▶ 鳥類→4色型色覚
- ▶ 魚類→3~4色型色覚

(番外)

昆虫→色覚があるらしいが不明

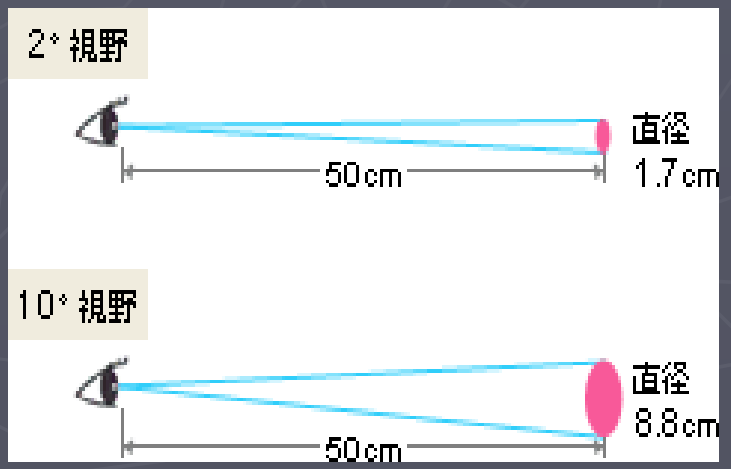
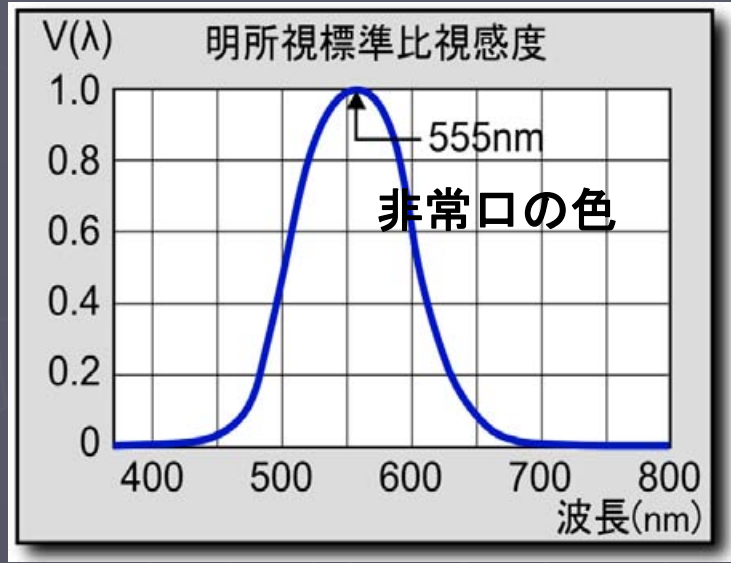
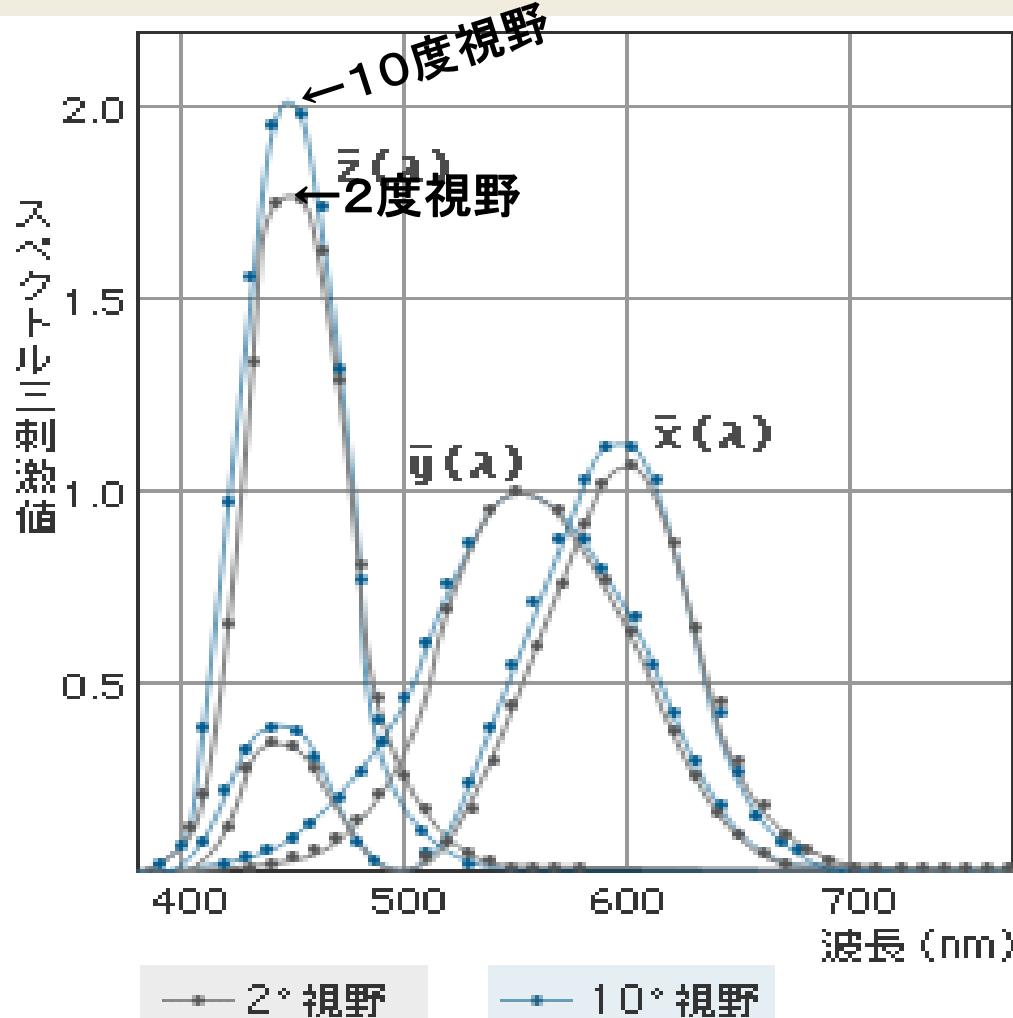
(蜂が黒を好み(黒に攻撃的)で蟻が白を好む)



工学的色の扱い(定常状態標準化)

等色関数と標準比視感度

2°視野および10°視野に基づく等色関数の比較



三刺激値とCIE XYZ 表色系

$$X = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{x}(\lambda) R_{(\lambda)}$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{y}(\lambda) R_{(\lambda)}$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{z}(\lambda) R_{(\lambda)}$$

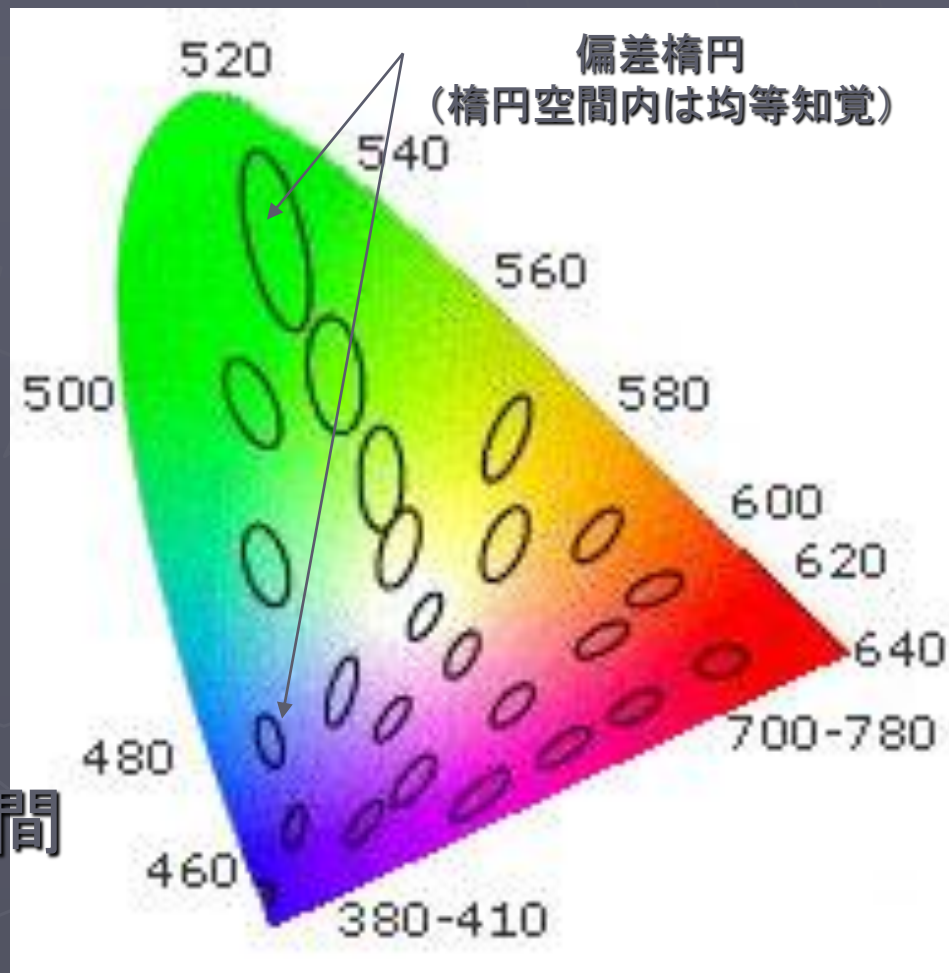
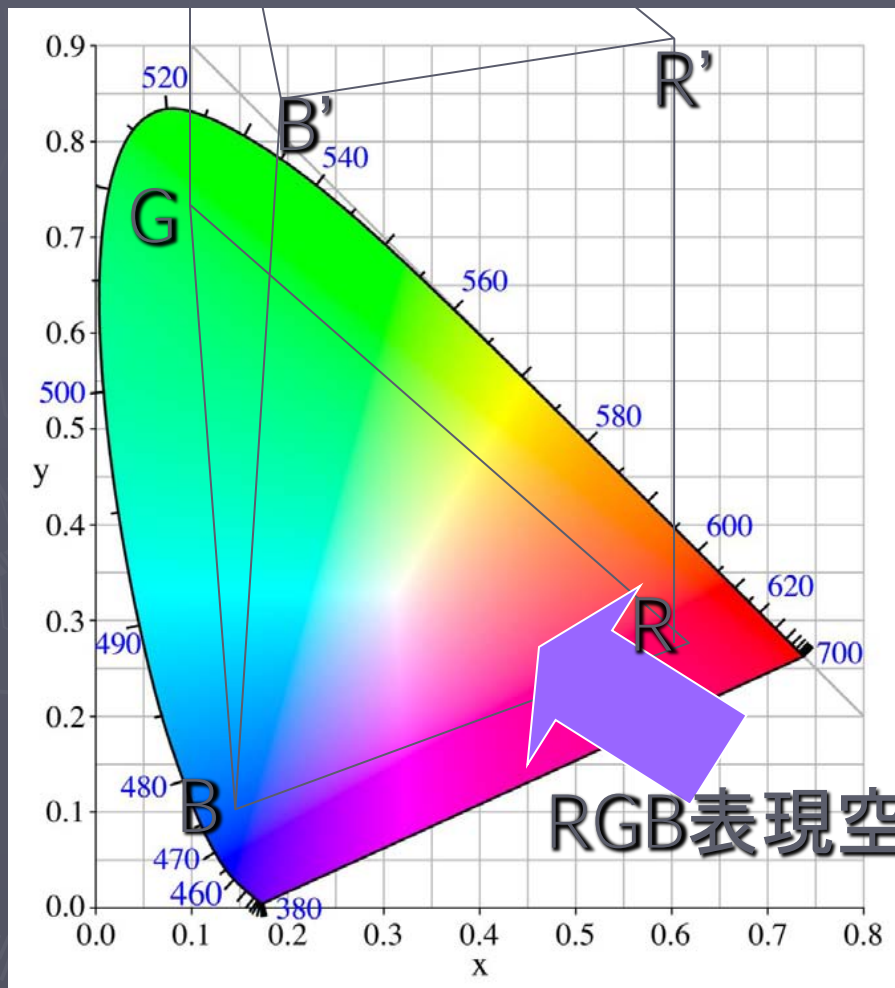
$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{y}(\lambda)}$$

- ▶ XYZ: 三刺激値
- ▶ $S(\lambda)$: 光源強度
- ▶ $R(\lambda)$: 反射率
- ▶ $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$: 等色関数
- ▶ K : 正規化係数

$$X = \frac{X}{X+Y+Z} \quad \begin{array}{l} \text{全刺激に占める} \\ \text{赤み刺激量} \end{array}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad \begin{array}{l} \text{全刺激に占める} \\ \text{黄緑刺激量} \end{array}$$

CIE xyY 表色系とMacAdamの偏差楕円 (等知覚空間)



CIE L*,a*,b*(1976) 表色系 (最も一般的な等知覚色空間)

XYZ \Rightarrow Lab

$$f_x = \begin{cases} \sqrt[3]{x_y} & x_y > 0.008856 \\ (903.3 \times x_y + 16) / 116 & x_y \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$f_y = \begin{cases} \sqrt[3]{y_y} & y_y > 0.008856 \\ (903.3 \times y_y + 16) / 116 & y_y \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$f_z = \begin{cases} \sqrt[3]{z_y} & z_y > 0.008856 \\ (903.3 \times z_y + 16) / 116 & z_y \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$x_y = X / X_y$$

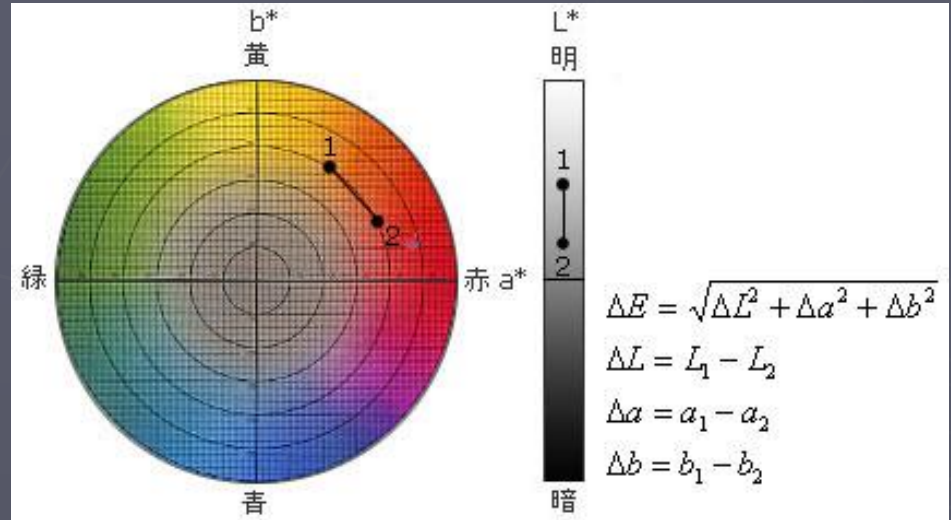
$$y_y = Y / Y_y$$

$$z_y = Z / Z_y$$

$$L = 116 \times f_y - 16$$

$$a = 500 \times (f_x - f_y)$$

$$b = 200 \times (f_y - f_z)$$



注意: 全空間域が均等ではなく、色差で1.0程度の微小空間だけが全色空間に渡って等価に比較できる。

eg., 東京-品川 vs 長岡-北長岡 OK

eg., 東京-鎌倉 vs 長岡-村上 NG

経験則から生まれた表色系

▶ マンセル空間

画家、教育者であるAlbert H. Munsell (1858-1918)

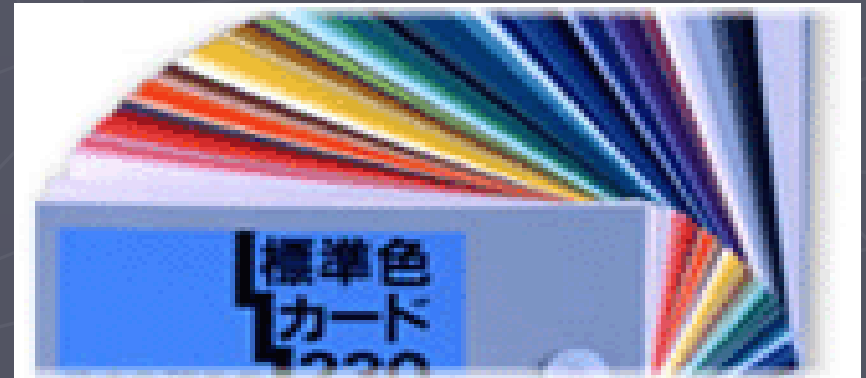
は、物体色を色の三属性に基づく三次元色空間の一点としてとらえ、

色相 (Hue · H)

明度 (Value · V)

彩度 (Chroma · C),

によって表示する方法を考案し、色の伝達が容易かつ正確になった。



標準色票による管理と留意点

▶ 標準色票で管理している工業製品例

某ハンバーグチェーンのドレッシング

食品包装

醸造品(清酒・ワインなど)

紙幣・有価証券

▶ 留意点→標準の状態では色を比較する 複数の人で観察する

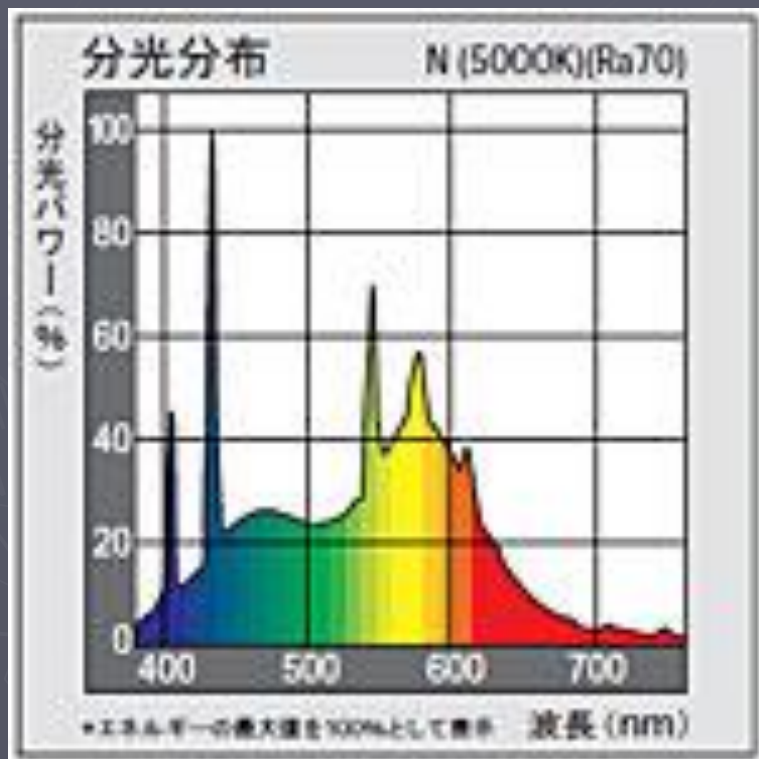
||

「条件等色」「色覚異常」「視野順応」

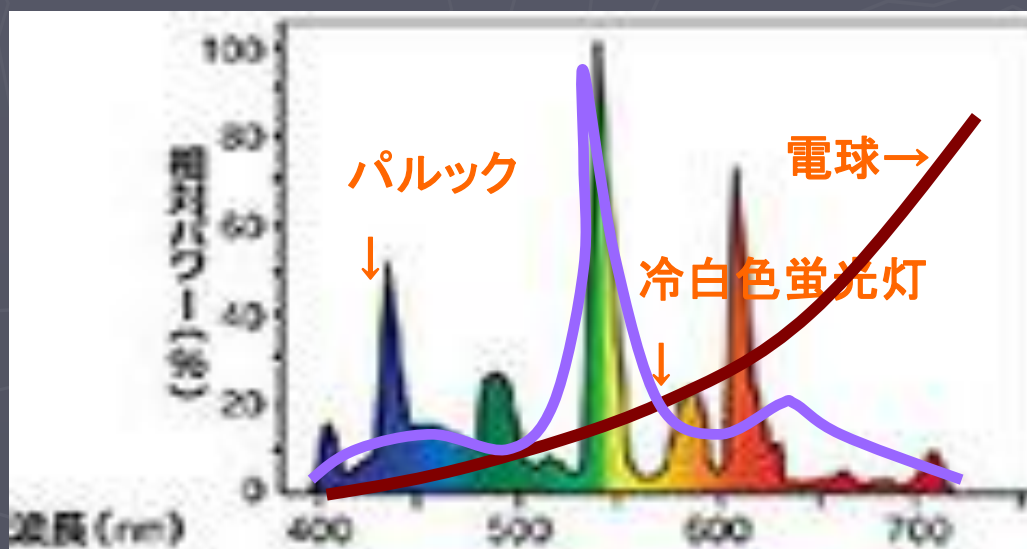
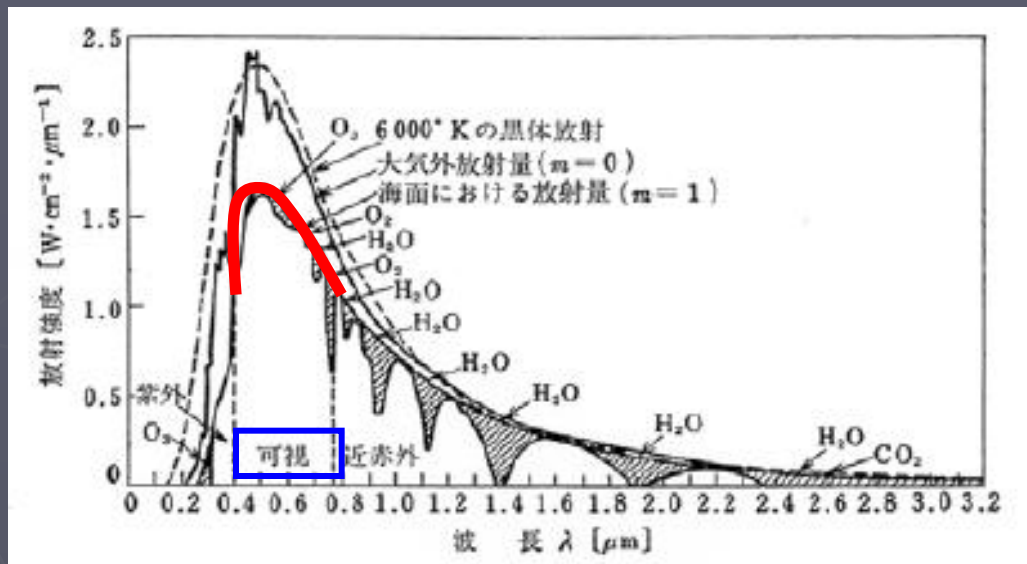
条件等色(メタメリズム)とは？

- ▶ ある条件で三刺激値が等しい2つの色は、ある条件でのみ等色である。
- ▶ ある条件とは、
「照明光」「観察視野」「視野角度」

条件等色 (照明光と分光分布)



印刷・写真評価用



条件等色とは、

RとR*が異なるにも関わらず、照明光S(λ)によっては、
左式と右式のX,Y,Zが同じ値となること。

$$X = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{x}_{(\lambda)} R_{(\lambda)}$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} R_{(\lambda)}$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{z}_{(\lambda)} R_{(\lambda)}$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)}}$$

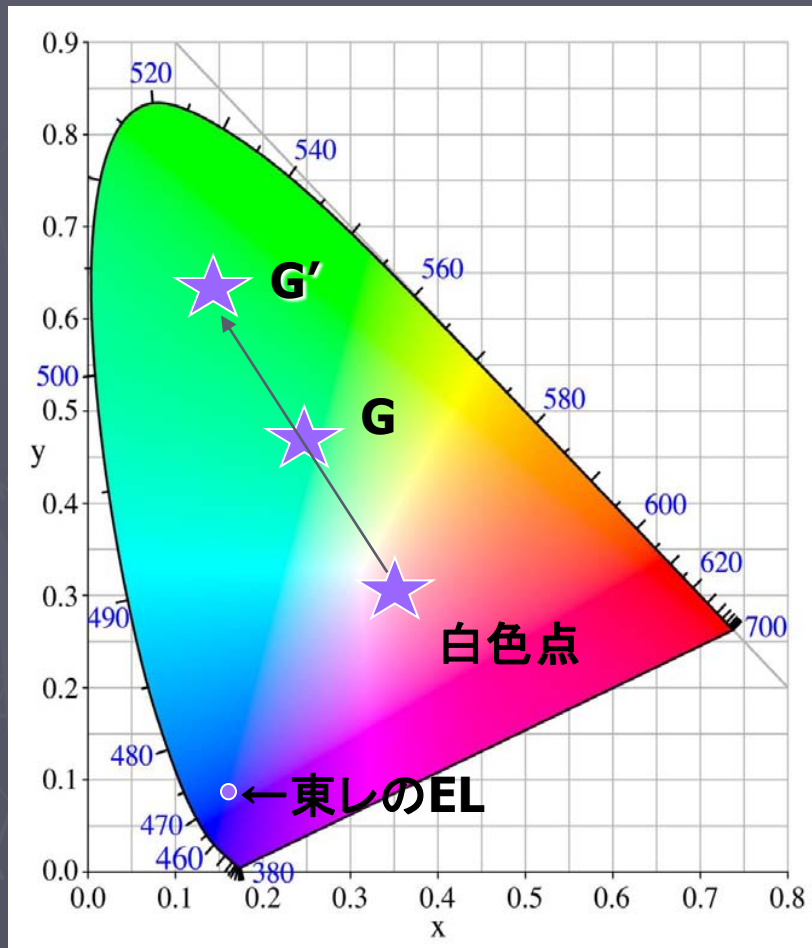
$$X = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{x}_{(\lambda)} R_{(\lambda)}^*$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)} R_{(\lambda)}^*$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{z}_{(\lambda)} R_{(\lambda)}^*$$

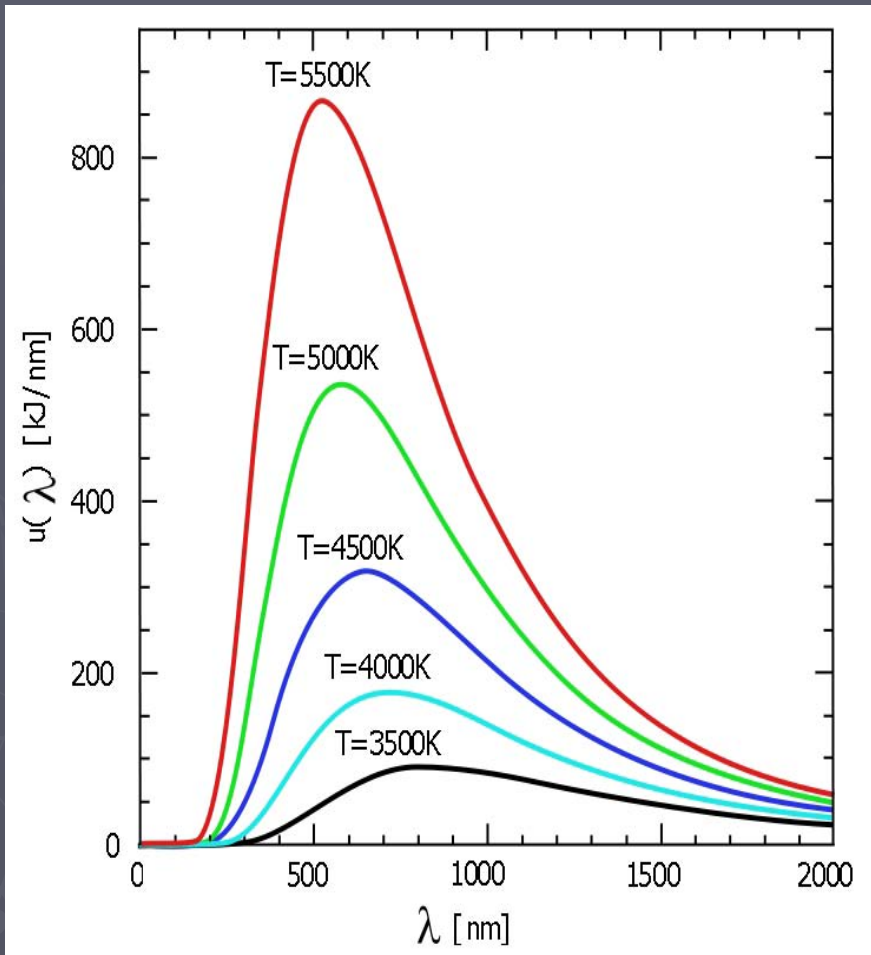
$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S_{(\lambda)} \bar{y}_{(\lambda)}}$$

色純度 (color purity)



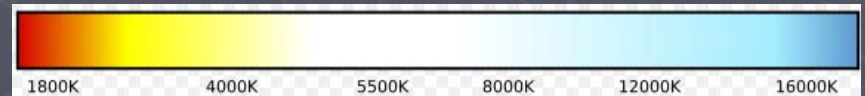
- ▶ 単色光と特定の白色光とを加法混色して試料の色と等しくなったときの単色光の刺激と、この特定の白色光の刺激との比。
- ▶ 東レは08年3月7日、フル・カラー有機ELディスプレイ用に世界最高レベルの高効率・高色純度を有する青色発光材料の開発に成功した。.....発光効率6cd/A、色純度(CIE(x,y)=(0.14,0.10))という、優れた発光特性を実現した。

色温度と白色点

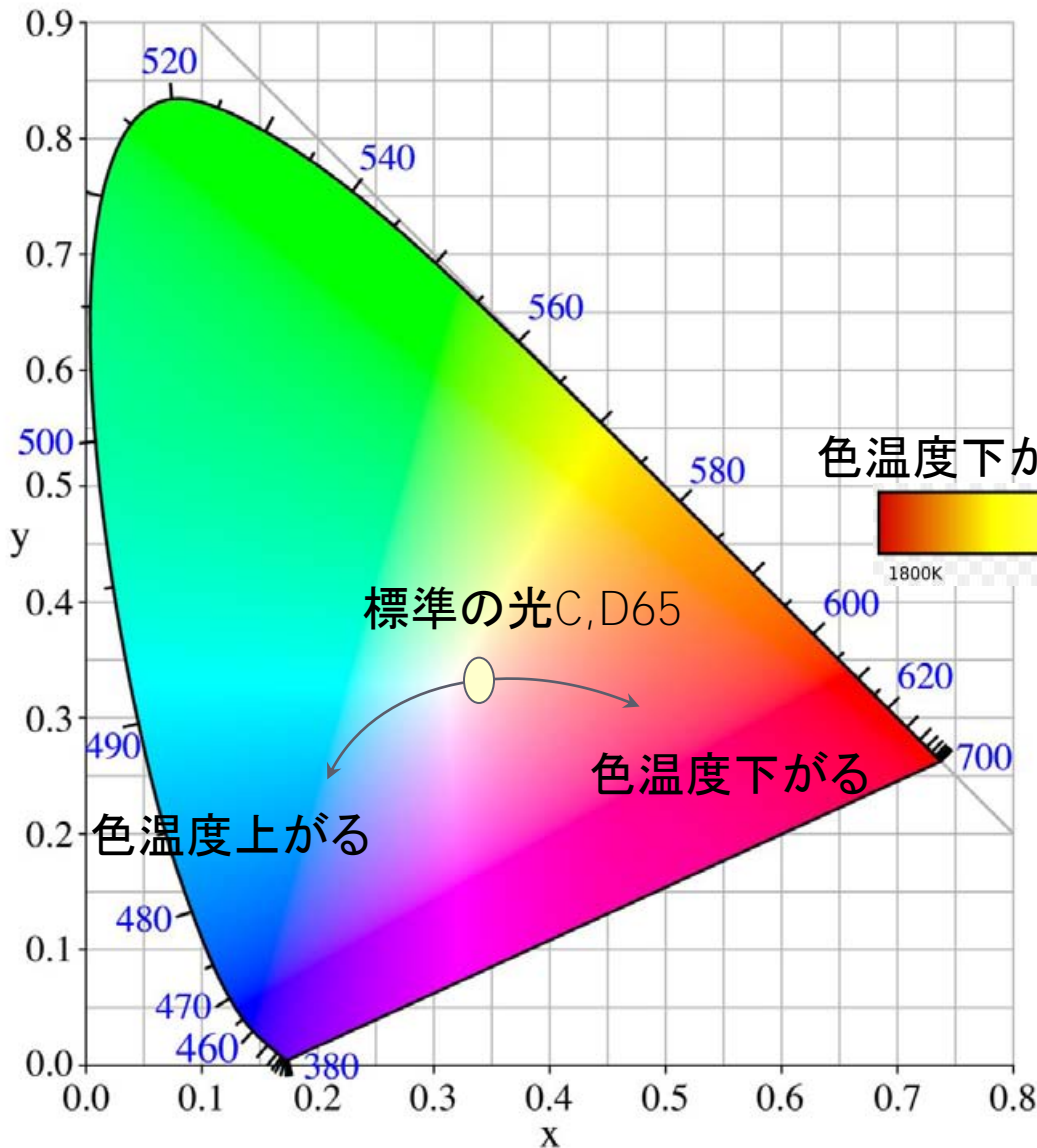


黒体放射スペクトル

- ▶ 黒体放射スペクトルとは、**温度 T** における黒体からの**電磁放射の分光放射輝度**
- ▶ 温度が高いと青みが強く、低くなると赤みが強くなる。
- ▶ 黒体温度を色温度ともいう。
- ▶ 恒星の表面温度は、恒星からの光のスペクトルを観測して決める。
- ▶ スタジオ撮影のライト(3200K, 標準の光A)、太陽光線が(5500K, 標準の光C)、アメリカのテレビ(NTSC)では色温度基準は6500K(標準の光D65)で、日本のテレビ(NTSC-J)の色温度基準は9300Kであり、パソコンのモニターも9300K

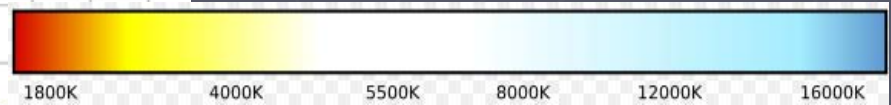


色度図上の白色点軌跡



色温度下がる

色温度上がる



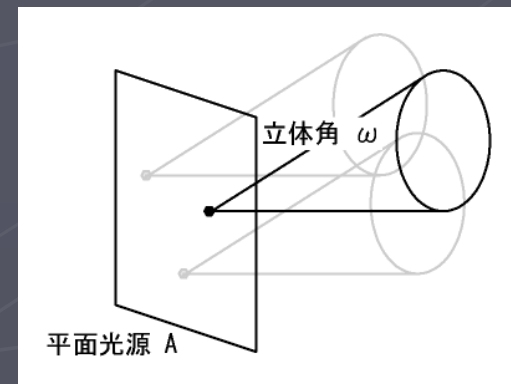
輝度 (luminance) と光度 (luminous intensity)

- ▶ 光度は、放射された光の単位立体角、単位時間あたりに放射される光の放射強度に比視感度をかけたもの。単位は、カンデラ cd。面積の概念がなく、恒星など光を点としてとらえている。

$$I_v = K_m \int I_e(\lambda) * V(\lambda) d\lambda$$

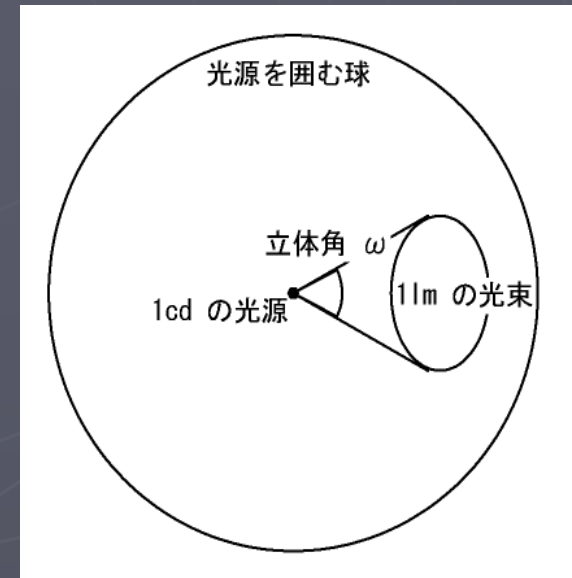
- ▶ 輝度は、平面状光源からある立体角に放射する光の光源における単位面積あたりの明るさのこと。単位は cd/m²。光源が広くなることによる明るさを無視できるように、面光源の面積 A で光度を割る (微分する) ことによって算出される。(ディスプレイなど平面状の発光体に適用)

$$L_\theta = \frac{dI_\theta}{dS \cos\theta}$$



光度と光束 (luminous flux)

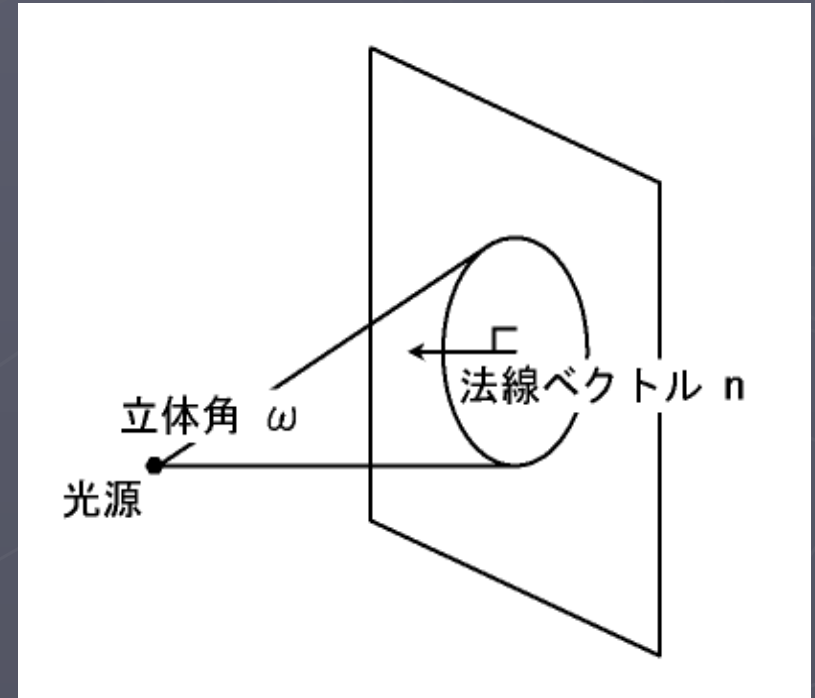
- ▶ 光束は光源からある方向に放射されたすべての光の明るさを表す心理的な物理量である。単位は、ルーメン (lm) またはカンデラステラジアン (cd·sr) である。
- ▶ ランプの仕様は光源から放射される全ての方向の明るさを全光束として表すことが多い。
- ▶ 光束は人間の感じる量を表す心理物理量のひとつであり、下の式で示される。
- ▶ $\Phi = \Omega$ 光度 [cd] Ω : 立体角 [sr]
- ▶ 右図において、光度 1cd の光源から 1sr の立体角に照射される光束が 1lm となる。



光束と光度 ($\omega = 1\text{sr}$)

照度 (illuminance)

- ▶ 平面状の物体に照射された光の明るさを表す心理物理量である。
- ▶ 単位面積あたりに照射された光束と等しい。単位は、 lx または lm/m^2 である。



LEDの明るさ表記

▶ 発光効率150lm/W白色LED“雷神”のご案内

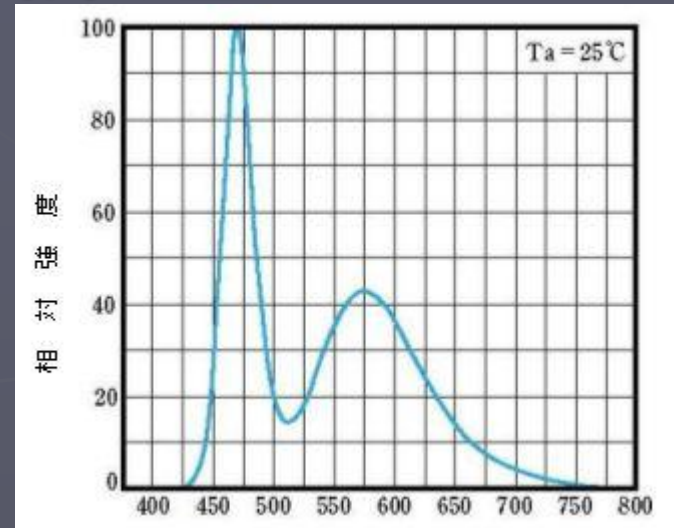
世界最高の発光効率(150lm/W@20mA)を達成したランプタイプLED・High Fluxシリーズ(Type:NSPWR70CS-K1)の販売を開始いたします。(日亜化学HPより)



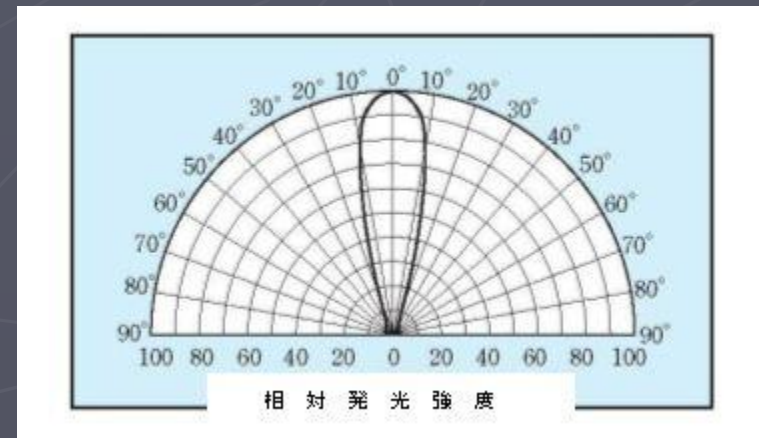
▶ 1Wあたり全ての放射角の総和で150lmの光束の発光するLEDを販売します。

LED照明の課題

- ▶ 発光スペクトルは素子の青色発光スペクトル(ピーク波長470nm)とそれにより励起された蛍光体の発光スペクトル(ピーク波長575nm)の合成されたものです。
- ▶ 指向性が強いランプであり、既存光源の全方向性と大きく異なる。
- ▶ 発熱箇所が既存ランプと反対



白色LEDの分光放射輝度
(疑似白色)



白色LEDの砲弾型指向性

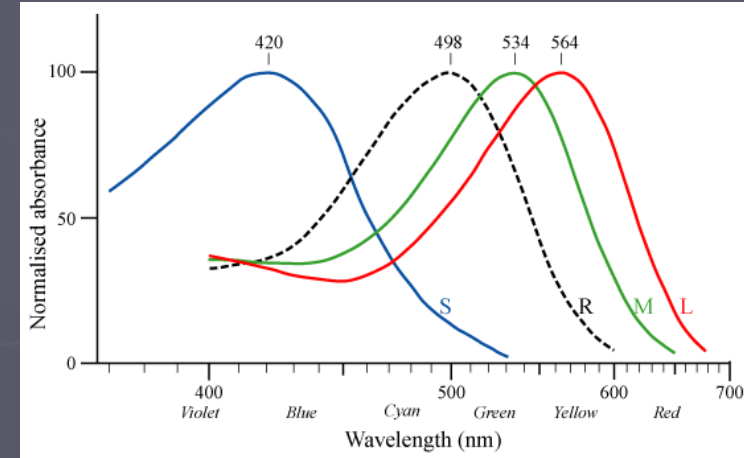
課題

拡散反射板および演色性向上

LEDの疑似白色と明るさ

- ▶ 赤-緑錐体の視感度のオーバーラップを利用して、黄色の波長に集中した光を使うと一つの波長の光で赤と緑の両方の錐体に感受させることができる。これに青を加えると、実際には青と黄色の2原色しかなくても、人間の目には青、緑、赤の光を感じたことと同じ結果になり、疑似白色を得ることができる。少ないエネルギーで視感度上は相当に発光効率の良い光源を得ることができる。

- ▶ 疑似白色のスペクトルは概ね2原色なので、被照体の色は太陽光下における色とは相当に異なる結果となるが、色彩の正確さをさほど必要としない照明用途においては有効である。

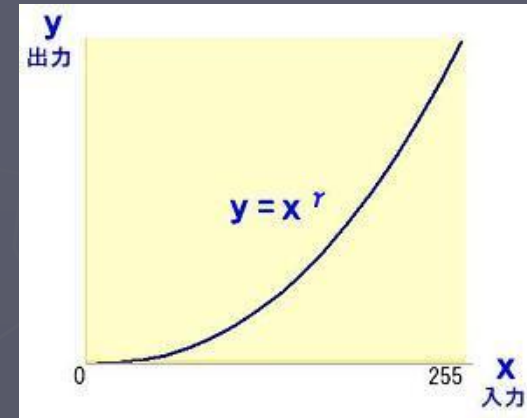


この原理を利用しているものが青黄色の疑似白色発光ダイオードである。

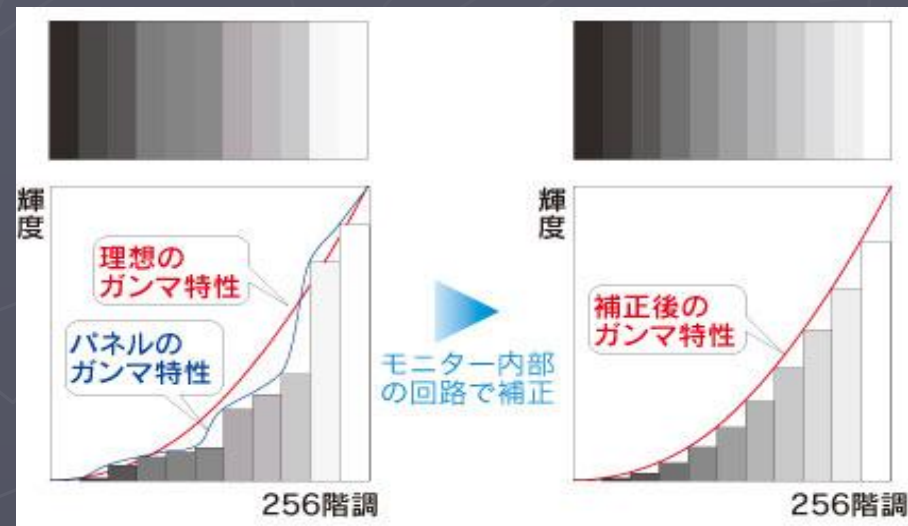
人間の目にとって100ルーメン/ワットを超えるような特に明るく見えるものは黄色光のスペクトルを強くしたものである。

γ(ガンマ)特性と補正

- ▶ 入力されたディスプレイの輝度信号(発光命令信号=物理量)と、実際のディスプレイ上の輝度(心理的な物理量)の関係がガンマ特性である。
- ▶ 完全な比例関係になっているわけではなく、ディスプレイの種類によっても違うので、自然に近い画像を表示するためにはガンマ値を調整することを「ガンマ補正」を行なうという。
- ▶ 8ビットで256階調の制御信号を送っても人間は均等な256階調の輝度で認識しない。
→ $256 * 256 * 256 = 1,6770$ 万色にはならない



理想的なガンマ特性



実際のガンマ特性(左)と補正後(右)

物体の艶消し・艶有り

▶ Question

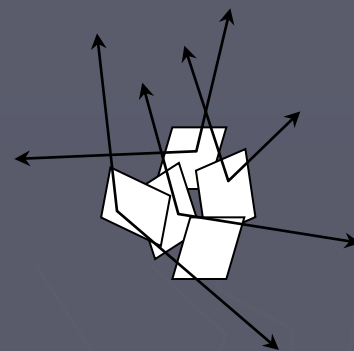
- ▶ 光の入射角と出射角は等しい(原則)
- ▶ 艶有りと艶なしの状態について、説明してください。
- ▶ 反射率100%は存在するか？

光の反射

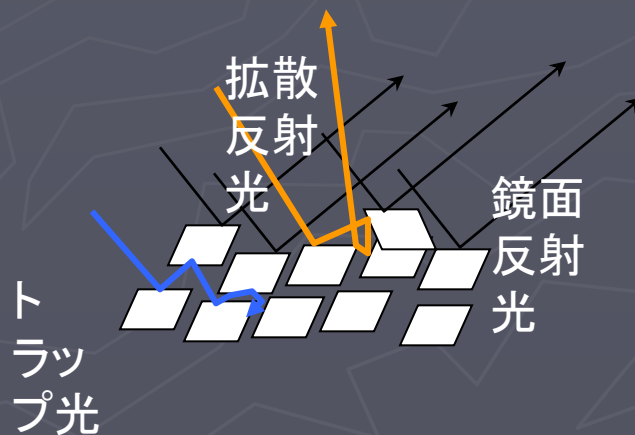
鏡面反射＝角型
(物体の表面が完全に平坦な場合)
eg., タイル、金属面



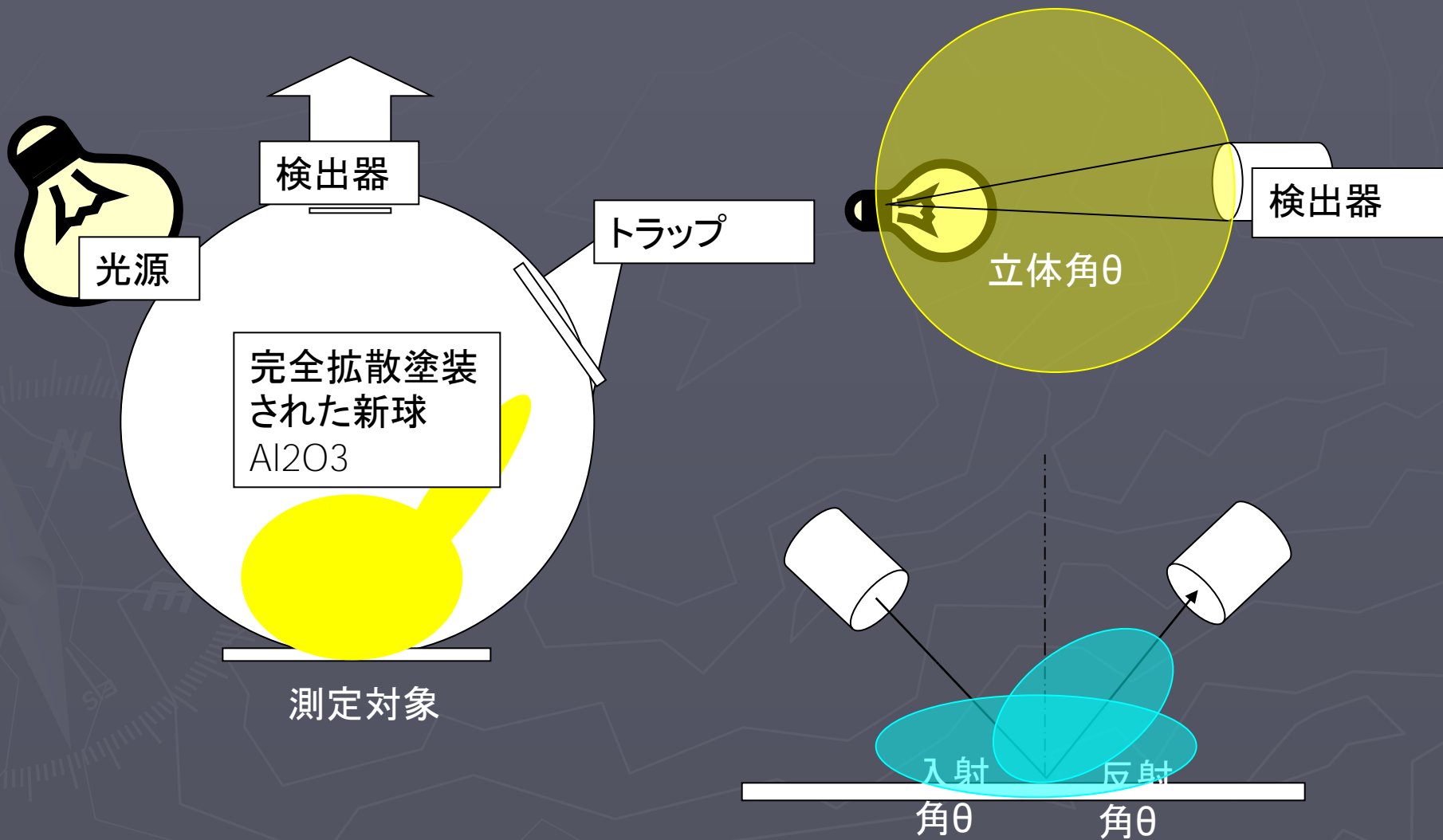
完全拡散反射＝半球型
(物体の表面が完全に均一に乱れている場合)
eg., チョーク、曇り硝子



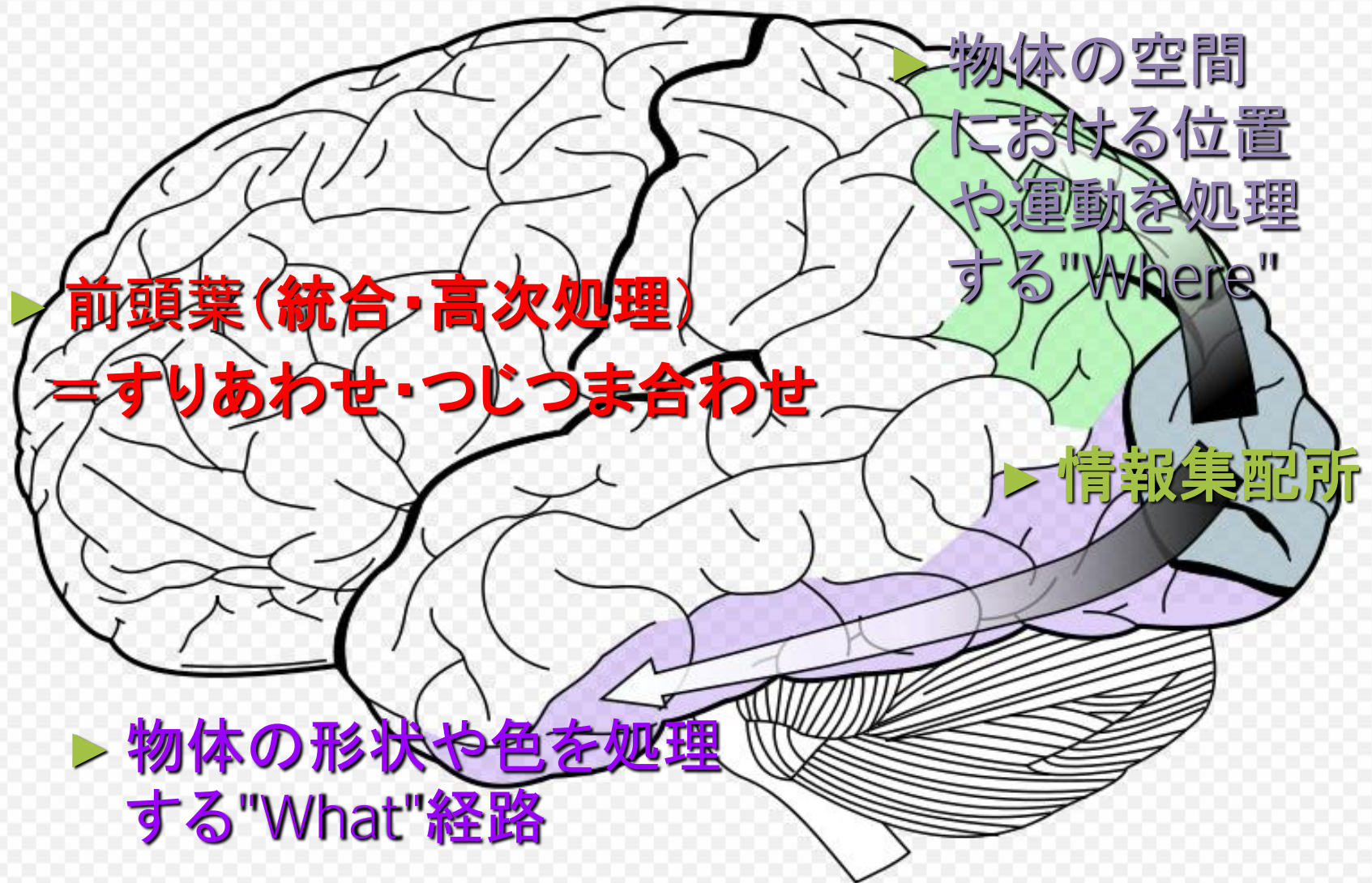
物体表面の分子に入射した光(電磁波)は、入射角・出射角同一の法則で反射する。
物体表面の分子がランダムに配列されている拡散反射面では、総体として半球型に光は反射する



光測定と光学系



色覚(色)は、視覚(色・形状・運動・テクスチャ・奥行きetc.,)の一部



蛙の視覚

- ①止まっているものには反応しない
- ②小さな動くものには捕食行動をおこす。
- ③大きな動くものには逃避行動をおこす。



- ▶ 網膜には機能的にClass1～5の5種類の神経節細胞を持ち、直線、カーブ、コントラスト、明るさ、そして暗闇に反応する。
暗闇に反応するClass5の細胞以外は、すべて『動き』があったときに反応。

昆虫などを補食対象とし、蛇や鷹などの捕食対象

前頭葉（統合・高次処理）

- ▶ 統合・高次処理とは、つつがなく快適（より高い目標）に生きていくための無意識なる“つじつま合わせ”
cf., “あばたもえくぼ”
- ▶ 色バランスの崩れたカラーモニターを見て嘔吐しないために必要。
- ▶ Feed-Back回路（かっこよくいえば）
- ▶ 合理的な錯誤（勘違い）