

画像メディア工学特論

表色系と色の知覚・再現

光と色について

- 光：物理的
 - 光はある波長域内 (380nm～760nm) の電磁波
 - 純粋な物理的立場では「色」という概念はない
(波長に関する連続的なエネルギー分布)
 - 色：心理的
 - 光エネルギーの知覚の一側面
 - 光の量的な強さは正確には知覚できない
 - 強さの相対的な分布(空間的分布, 波長域的分布)が知覚される
- 色を学ぶには, 人を学ばざるを得ない

眼球

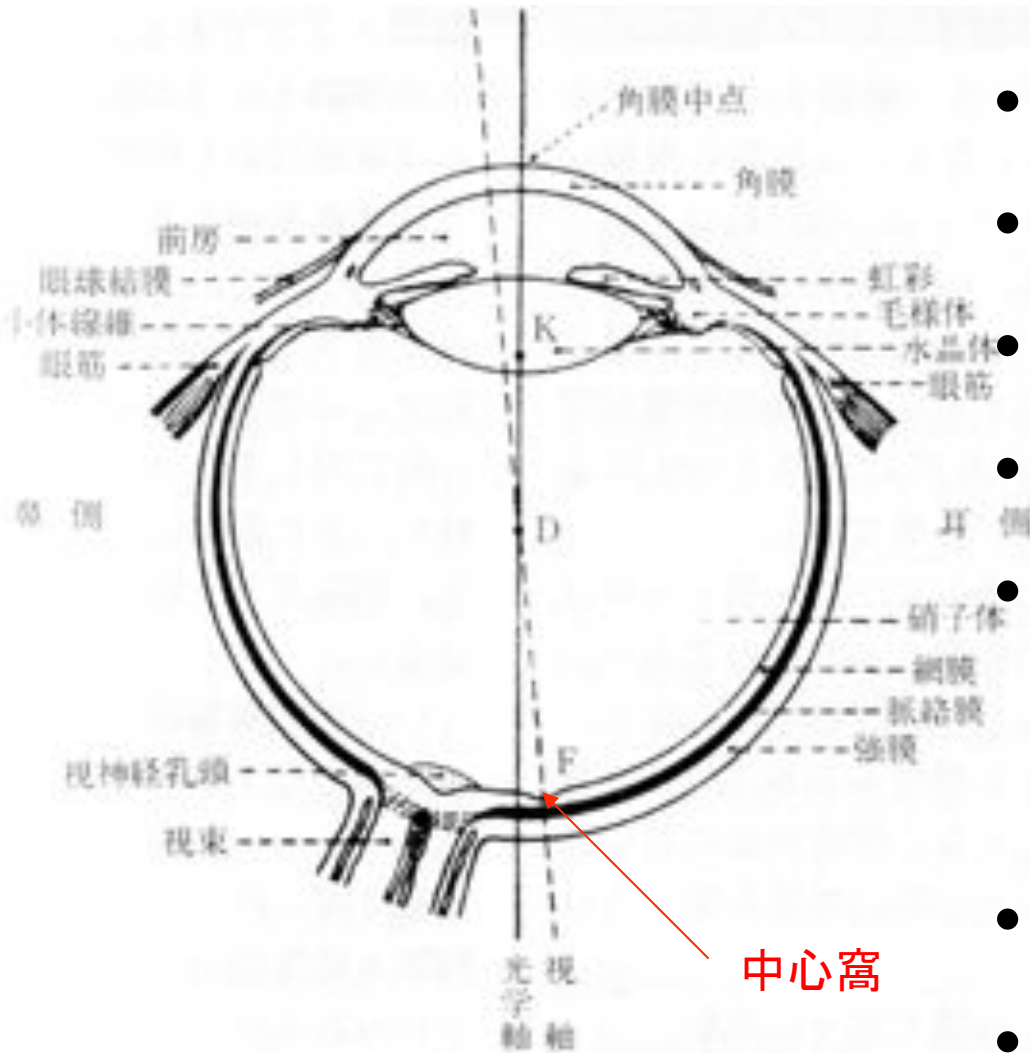


図 11.1 右眼球の水平断面図(°改変)

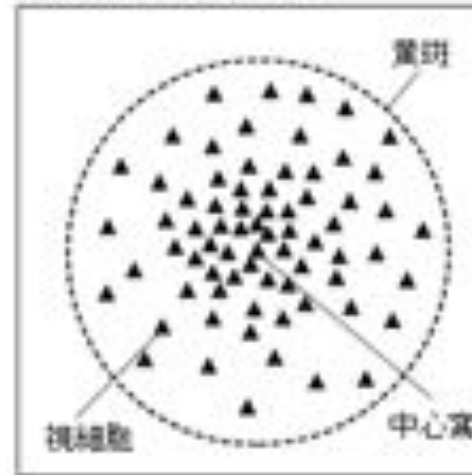
K: 節点, D: 回旋点, F: 黄斑の窩底(中心窩)

- 直径約 24mm
- 水晶体: レンズ
- 虹彩: 絞り
- 光学軸: 水晶体の光軸
- 視軸: 最も分解能(解像度)の高い軸(光学軸との傾きは約 4°)
- 焦点距離: 約17mm
- 網膜: フィルム or CCD

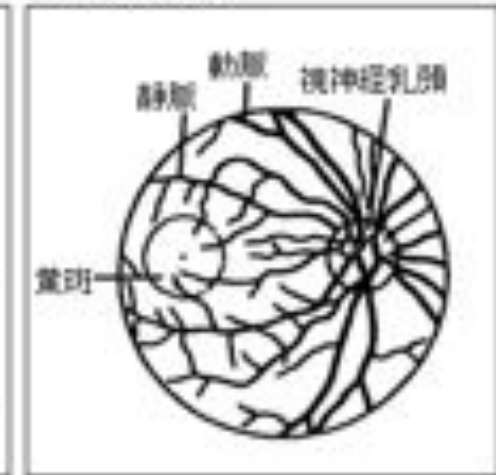
中心窩



【視細胞の分布】



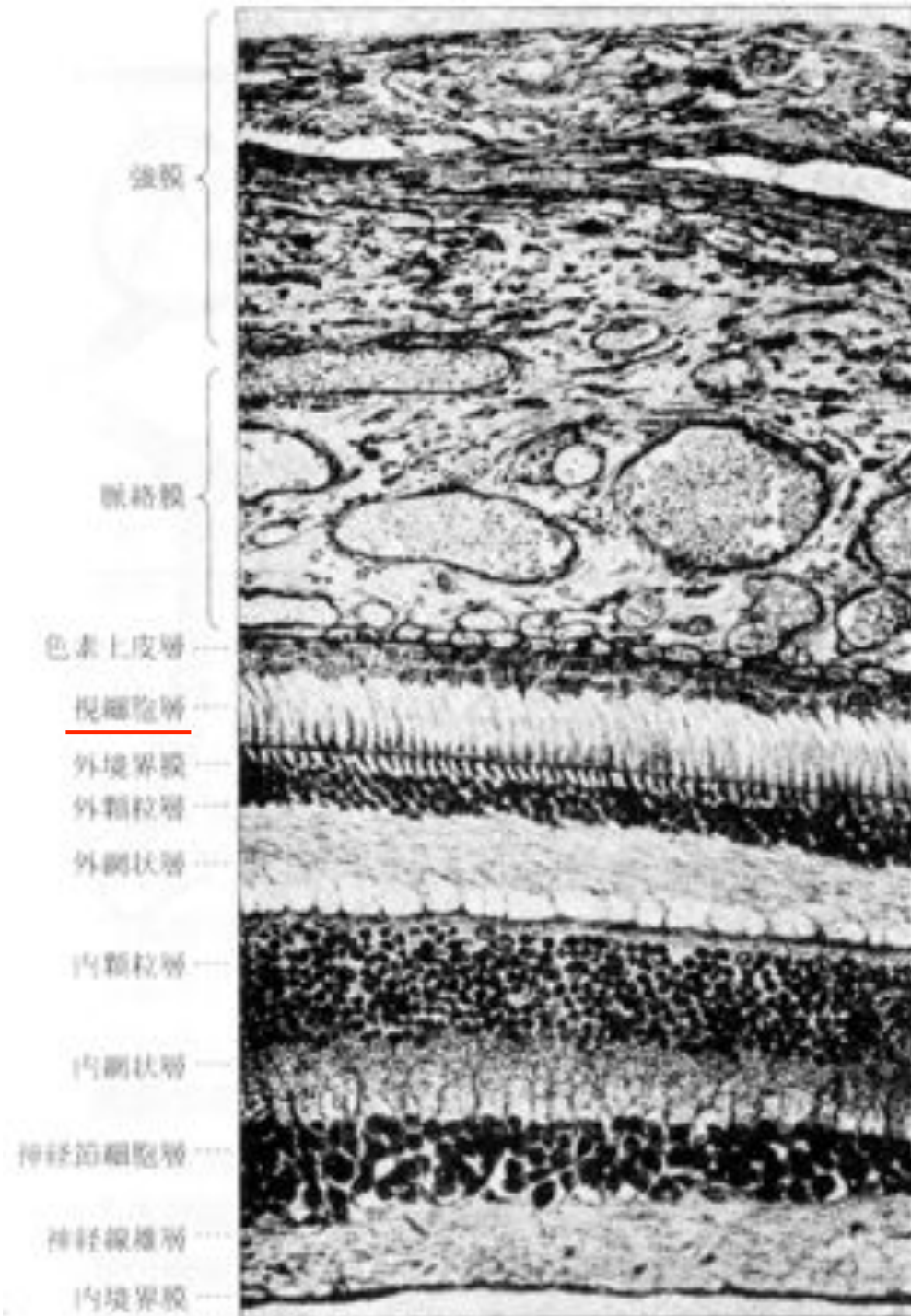
【正常眼底】



- 網膜中で最も解像度が高い部分
 - 視細胞が密集している
 - 視神経が周囲から集まっている(厚みが薄い)

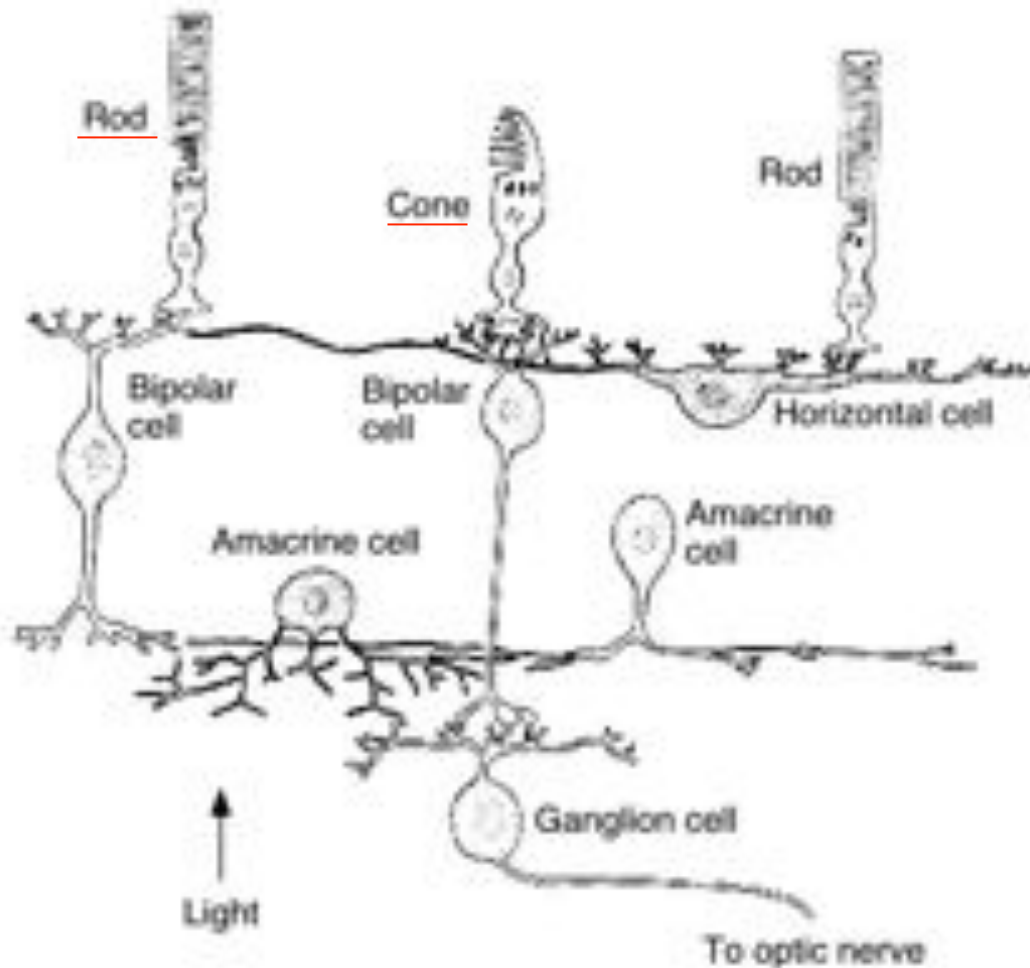
網膜(1)

- 「視細胞」が光エネルギーを電気信号に変える
- 視細胞よりも水晶体側に視神経が通っている(中心窩では非常に薄い)



水晶体側(眼球の中心方向)

網膜(2)

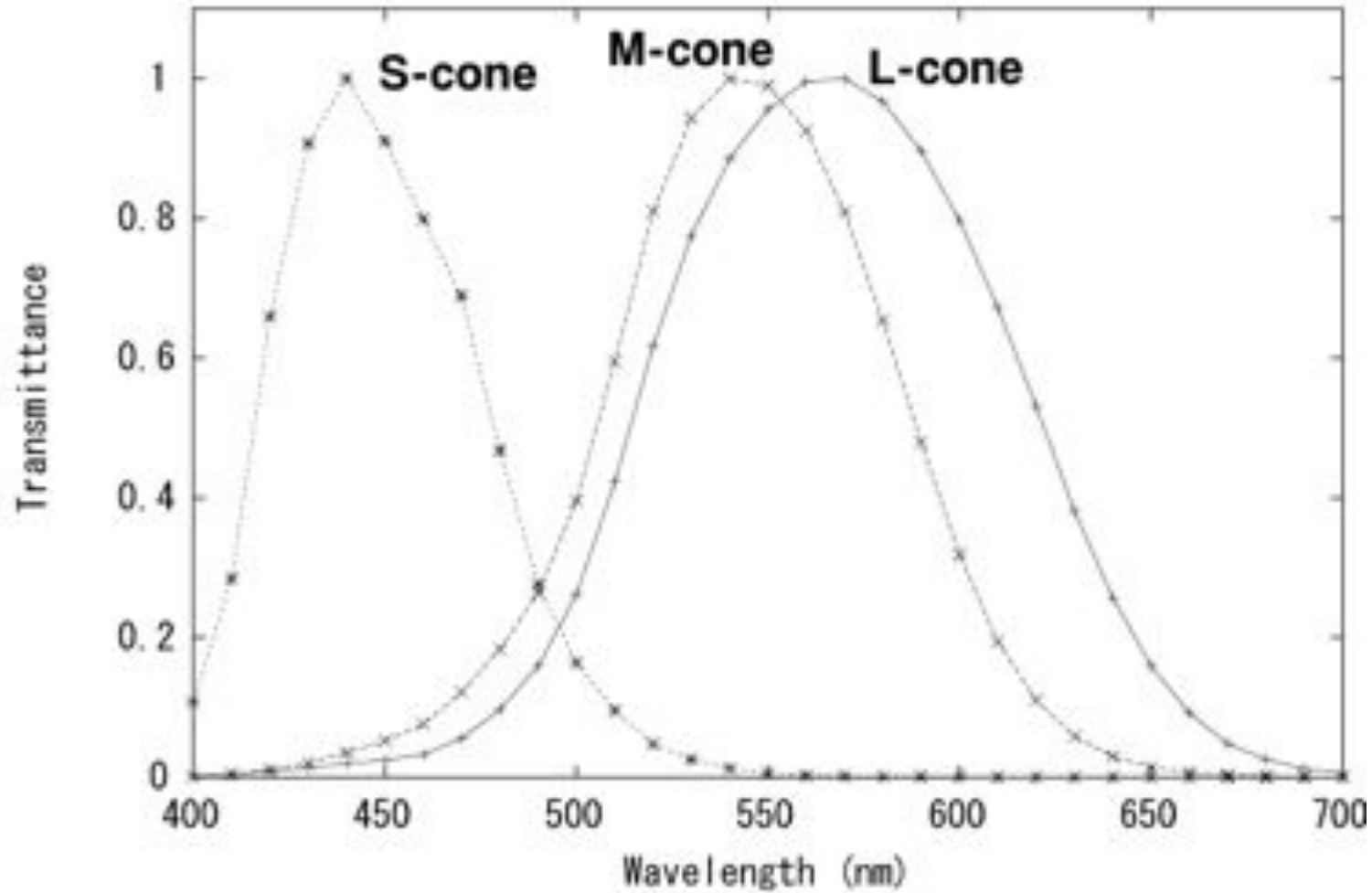


- 視神経から直接脳へ信号が伝達されるのではなく、網膜内で簡単な画像処理が行われる(初期視覚)
- ガボール変換に近い画像処理(エッジの密度・強度・方向の抽出)

桿体と錐体

- 桿体(rod)
 - 暗いときに働く
 - 視野の中心にはほとんどない
(中心窩では暗いものは見えない)
- 錐体(cone)
 - 明るいときに働く
 - 色を知覚する (S-cone, M-cone, L-cone)
3種類しかないので, 人間の色知覚は3自由度
視野の中心(中心窩)ほど密度が高い

錐体の分光感度特性



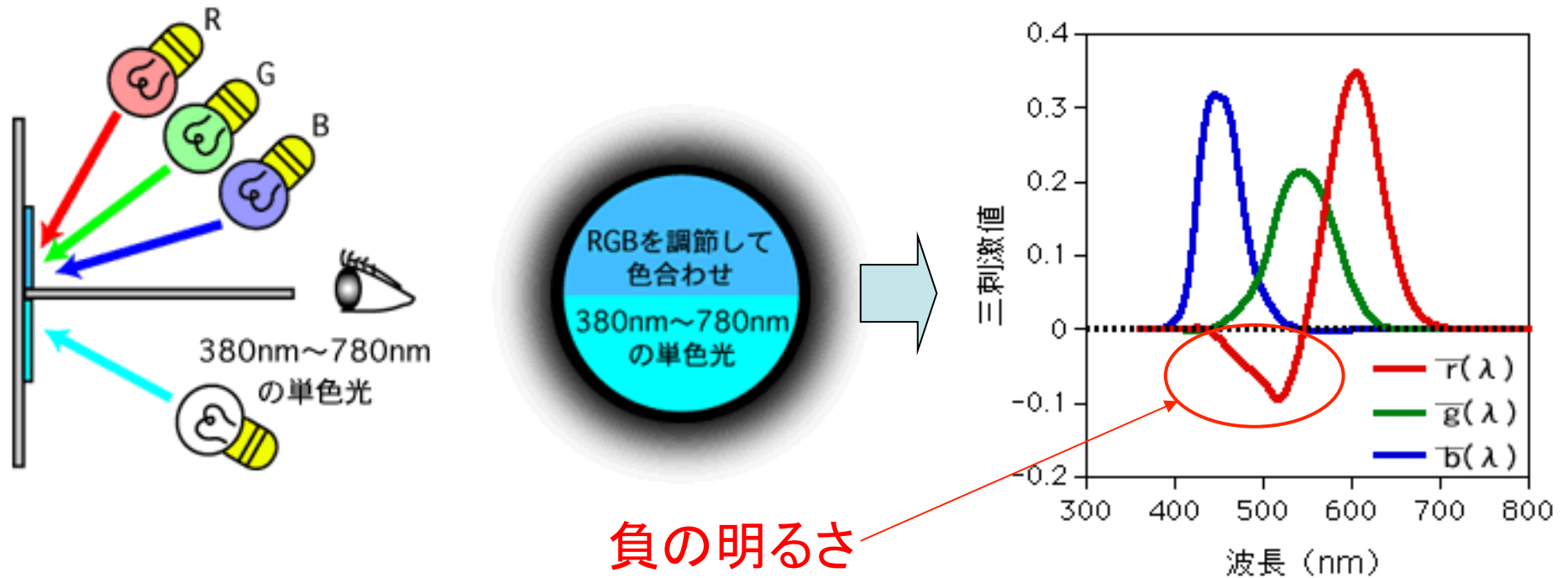
神経生理学的に測定

人間の色知覚の調べ方

光の各波長と色知覚の関係を調べる

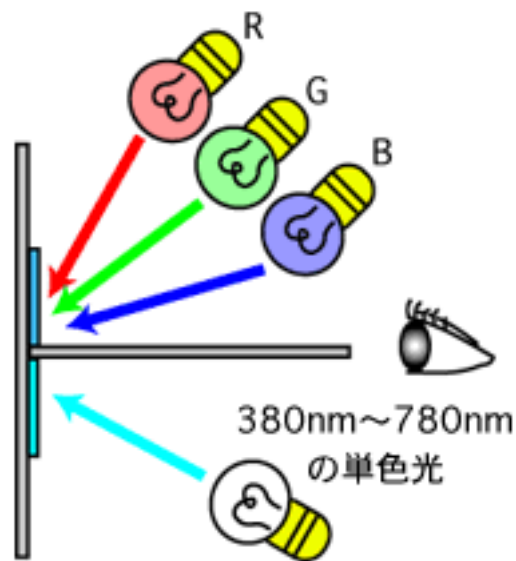
- 神経の興奮度を調べる方法
 - 測定が難しい
 - 本当に知覚のレベルを測っているのか？
(神経生理≠知覚)
- 外部からの観察により調べる方法
 - 単一スペクトルと3色混合の比較
 - 座標変換の自由度が残存(後述)

等色実験(1)

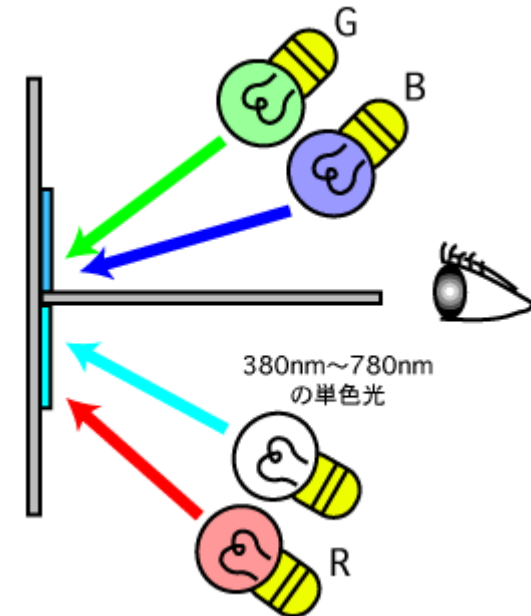
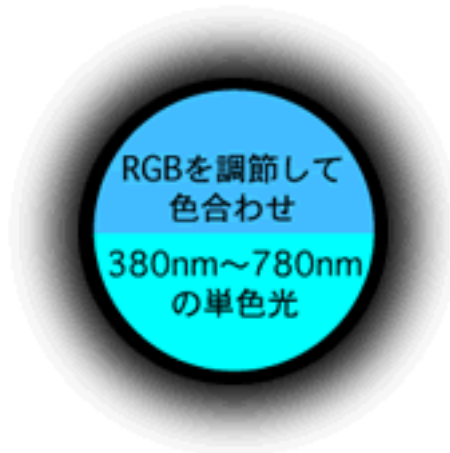


- 単色光(単一スペクトル光)と見えが等しくなるようにR,G,Bの光源の明るさを変化させる
 - R : 700nm G : 546.1nm B : 435.8nm

等色実験(2)



全て正の値の場合

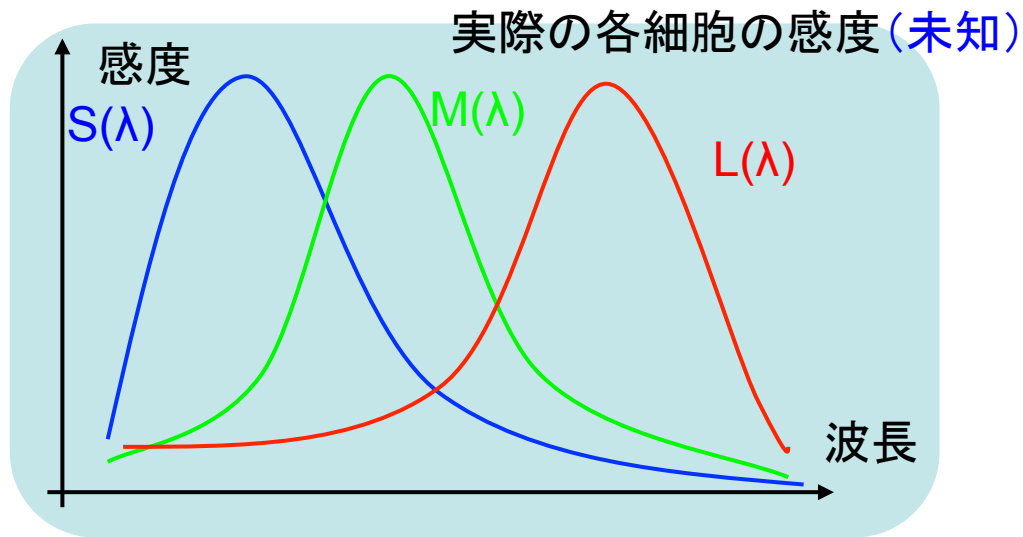


負の値を与える場合

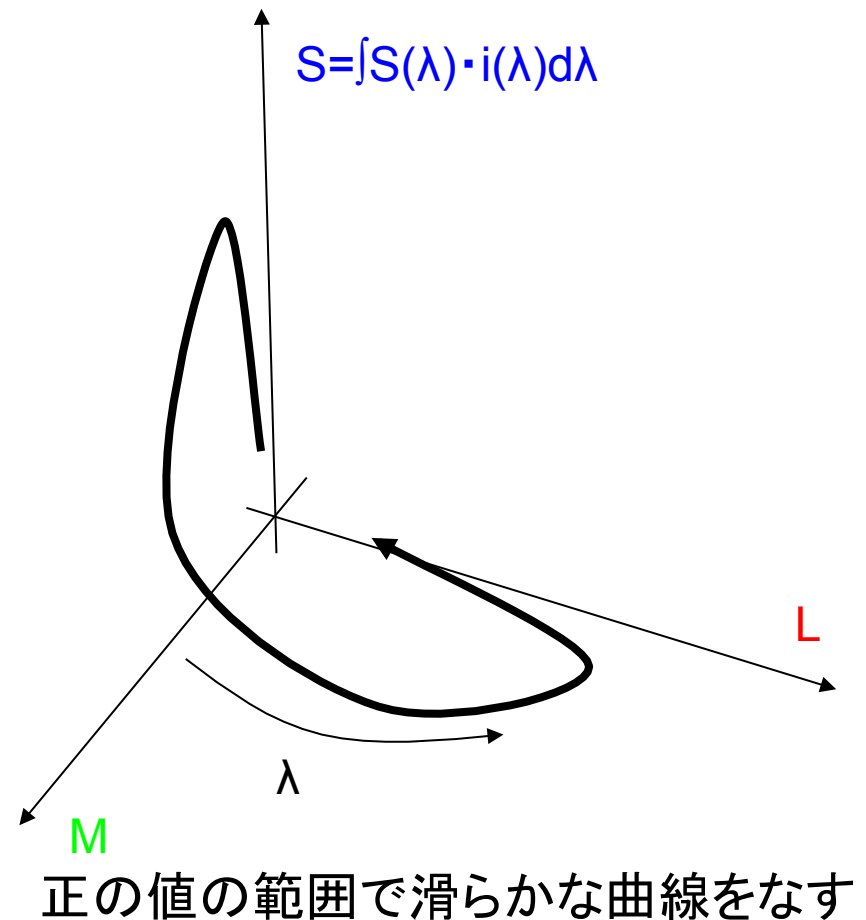
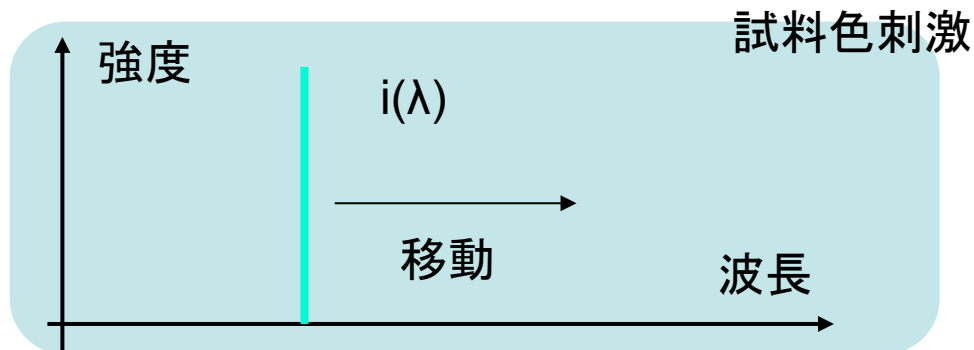
- 負の値は，反対側を照明することで実現する

なぜ「負の感度」が発生するのか(1)

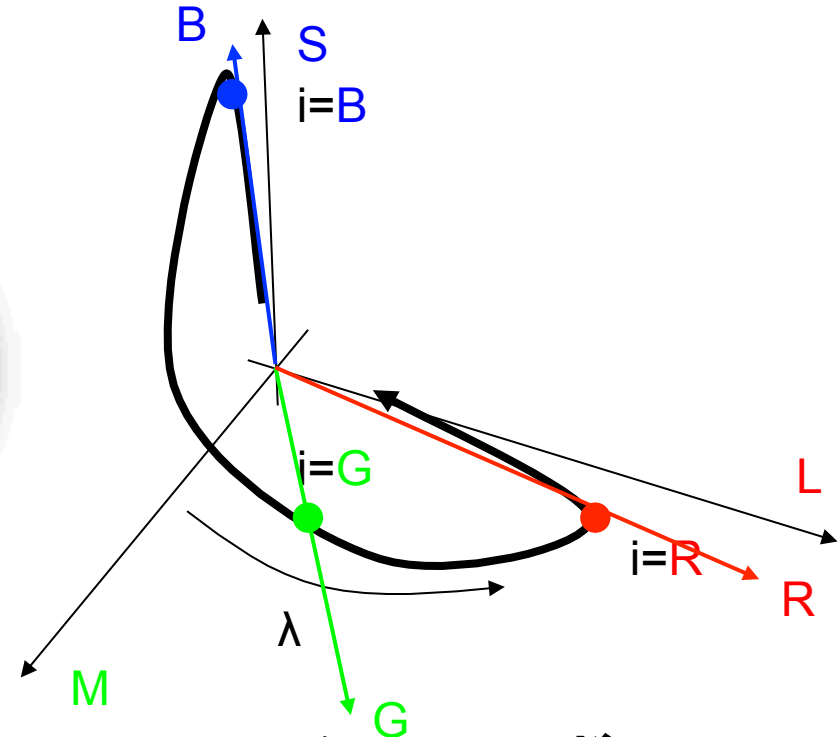
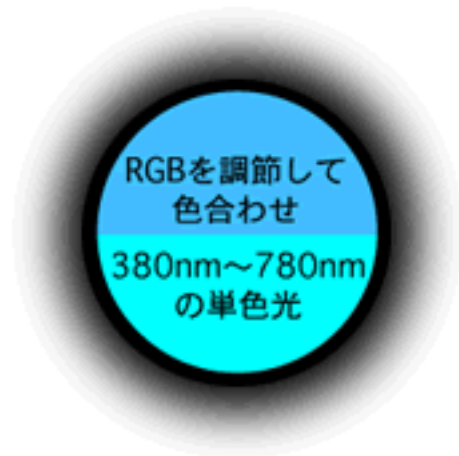
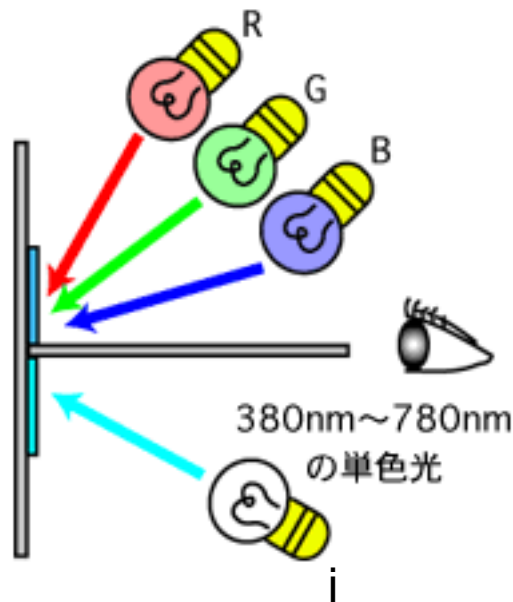
- 人間の網膜が負の感度を持つわけではない



×

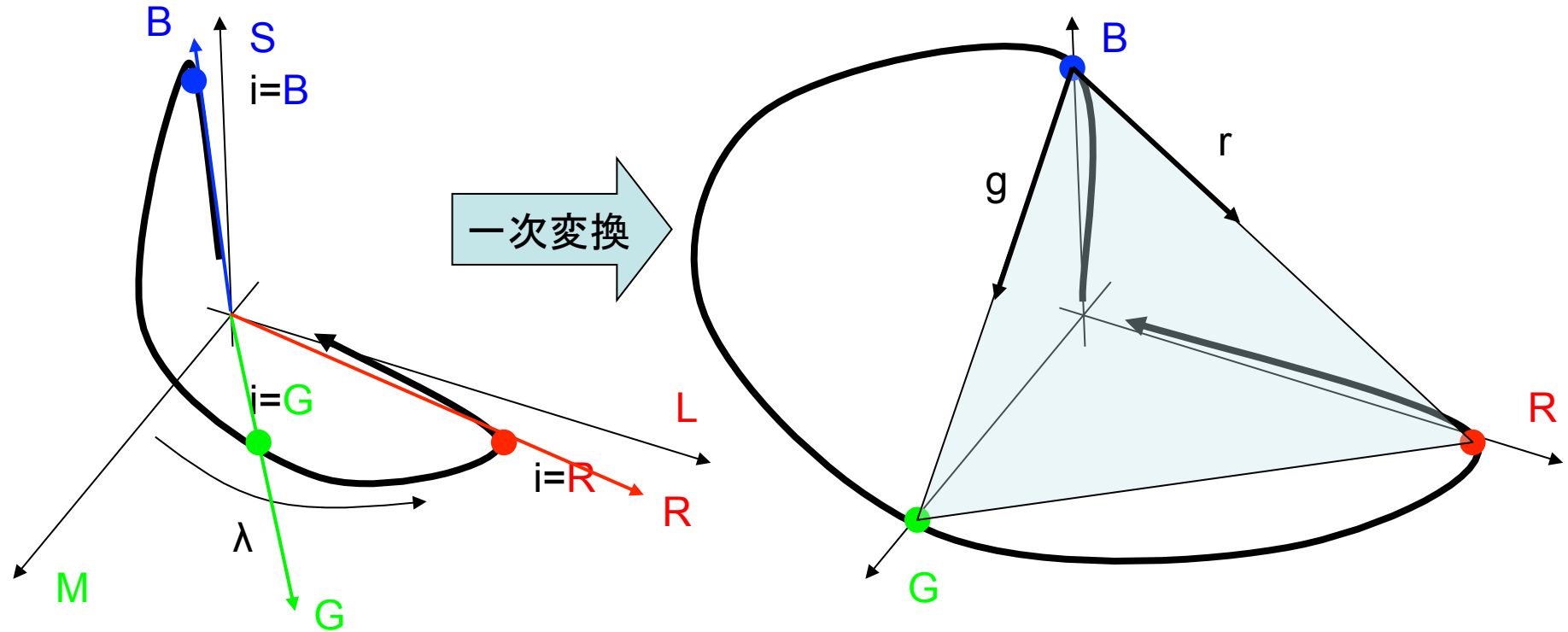


なぜ「負の感度」が発生するのか(2)



- $i = 700\text{nm}(R)$ だと $R > 0$, $G = B = 0$ となるはず
 - RGB 空間は視神経の興奮度が張る空間より狭いので、例えば B と G の間の波長に関しては R が負の値でなければならないということになる

rg色度座標



- RGB の相対値である rg 色度座標へ変換
 $r = R/(R+G+B)$, $g = G/(R+G+B)$
単色光は $(r,g)=(0,0)$, $(0,1)$, $(1,0)$ の3点を通る

rg色度図と RGB 等色曲線

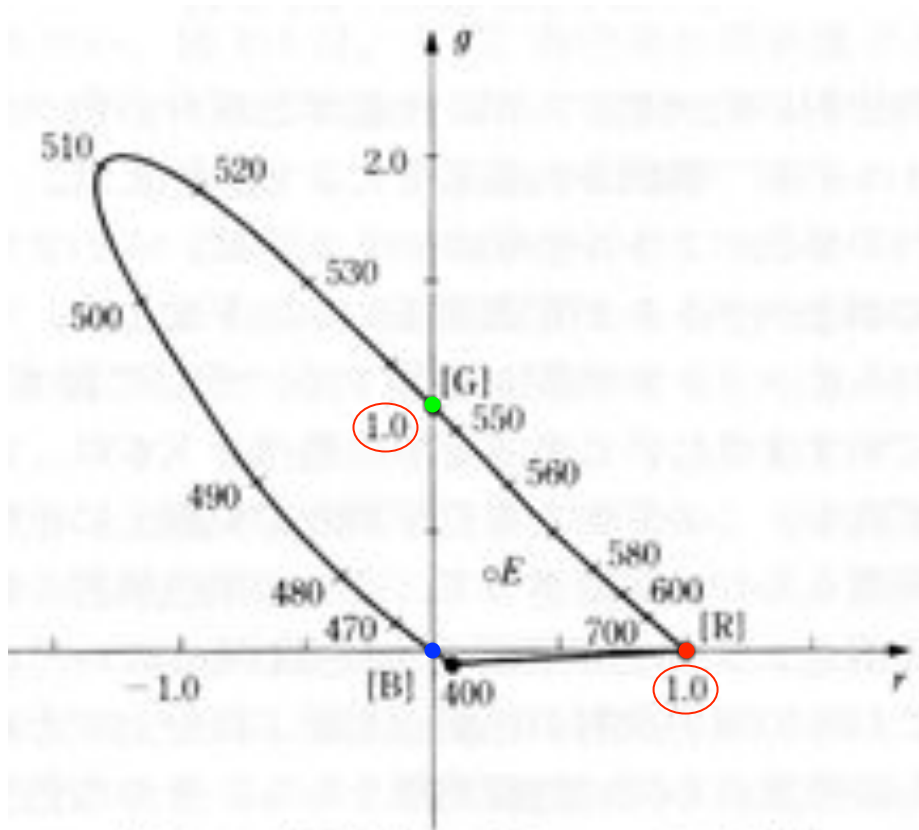


図 4.4 rg 色度図におけるスペクトル軌跡

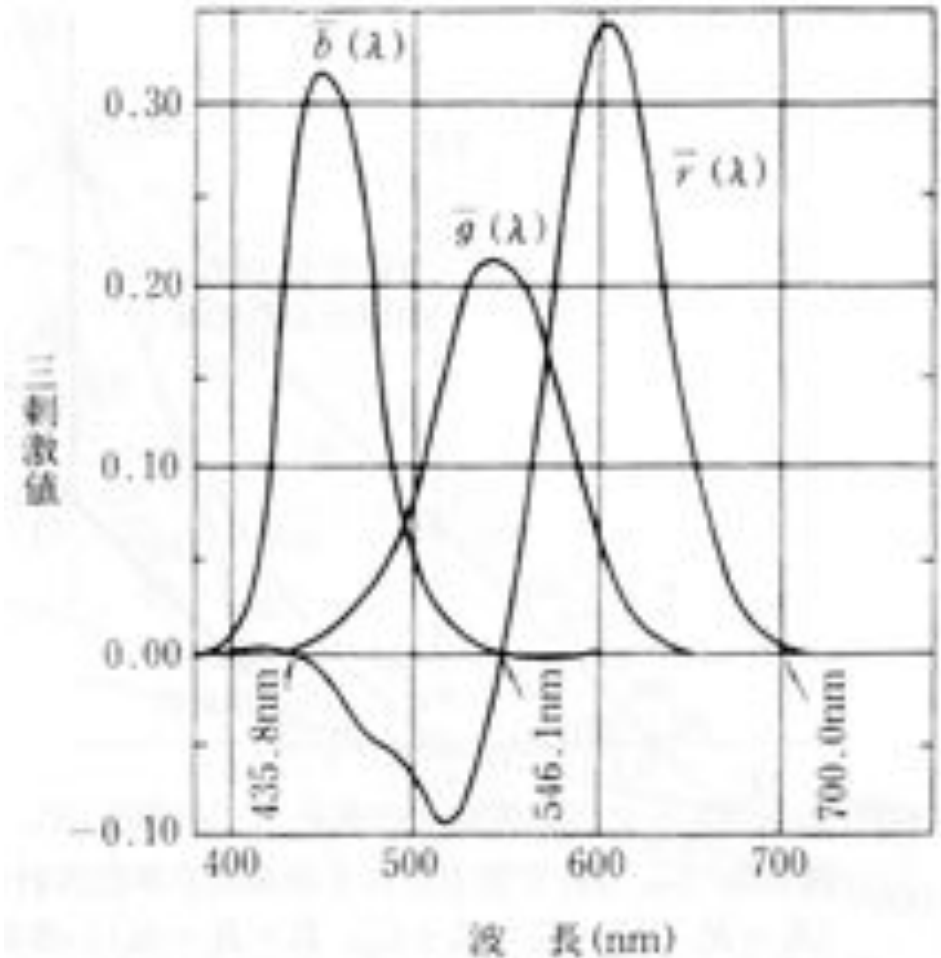


図 4.3 RGB 表色系の等色関数

- 負の値を持つ関数であることが分かる

XYZ表色系

- RGB 表色系の等色関数が負の値を示すことによる不都合を回避するための表色系

左図のように、スペクトル軌跡を内包するように座標系を新たに取り直す。

X, Y, Z の3点はスペクトル軌跡の外に位置するので、現実には存在し得ない「**虚色**」と呼ばれる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

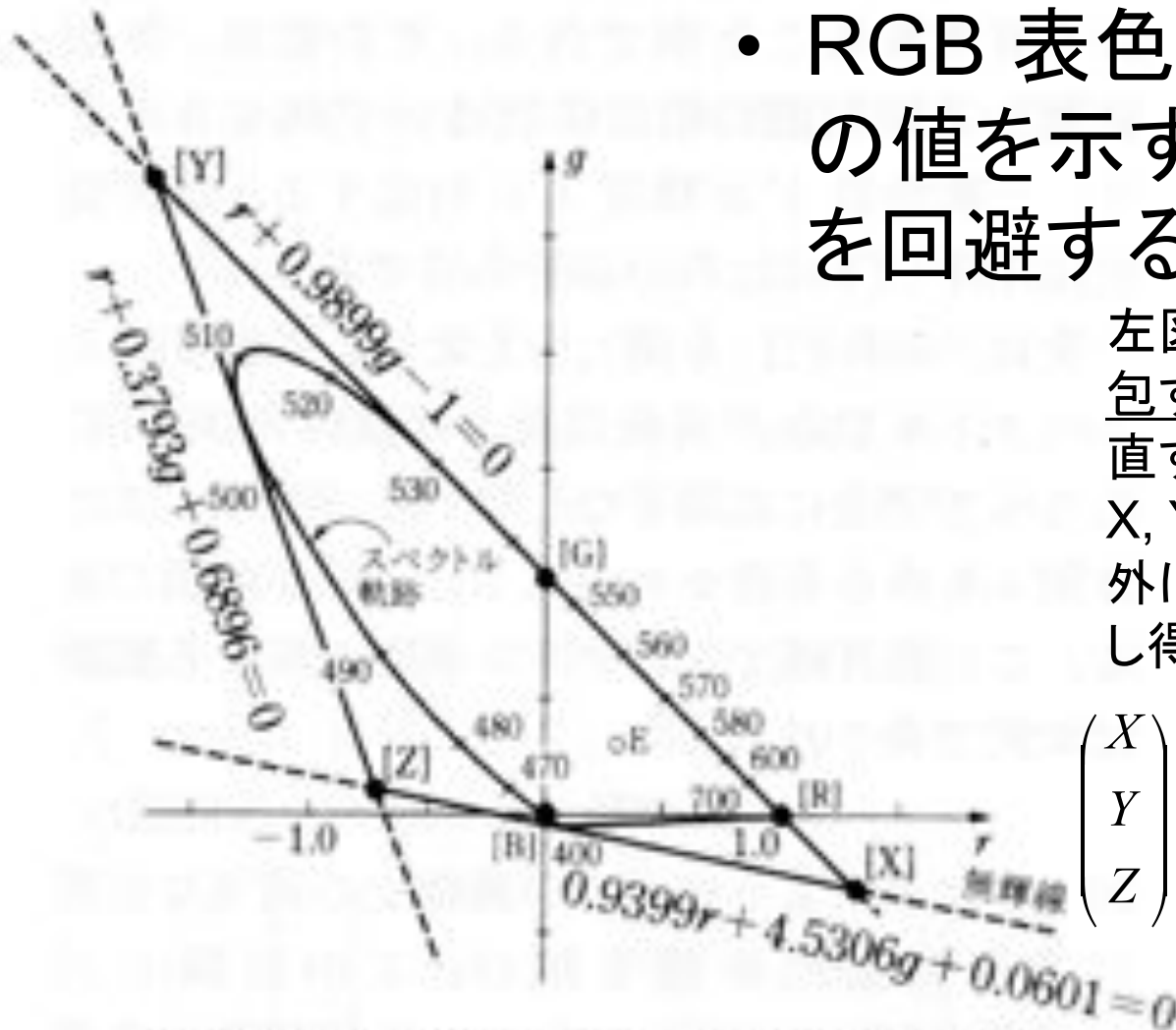
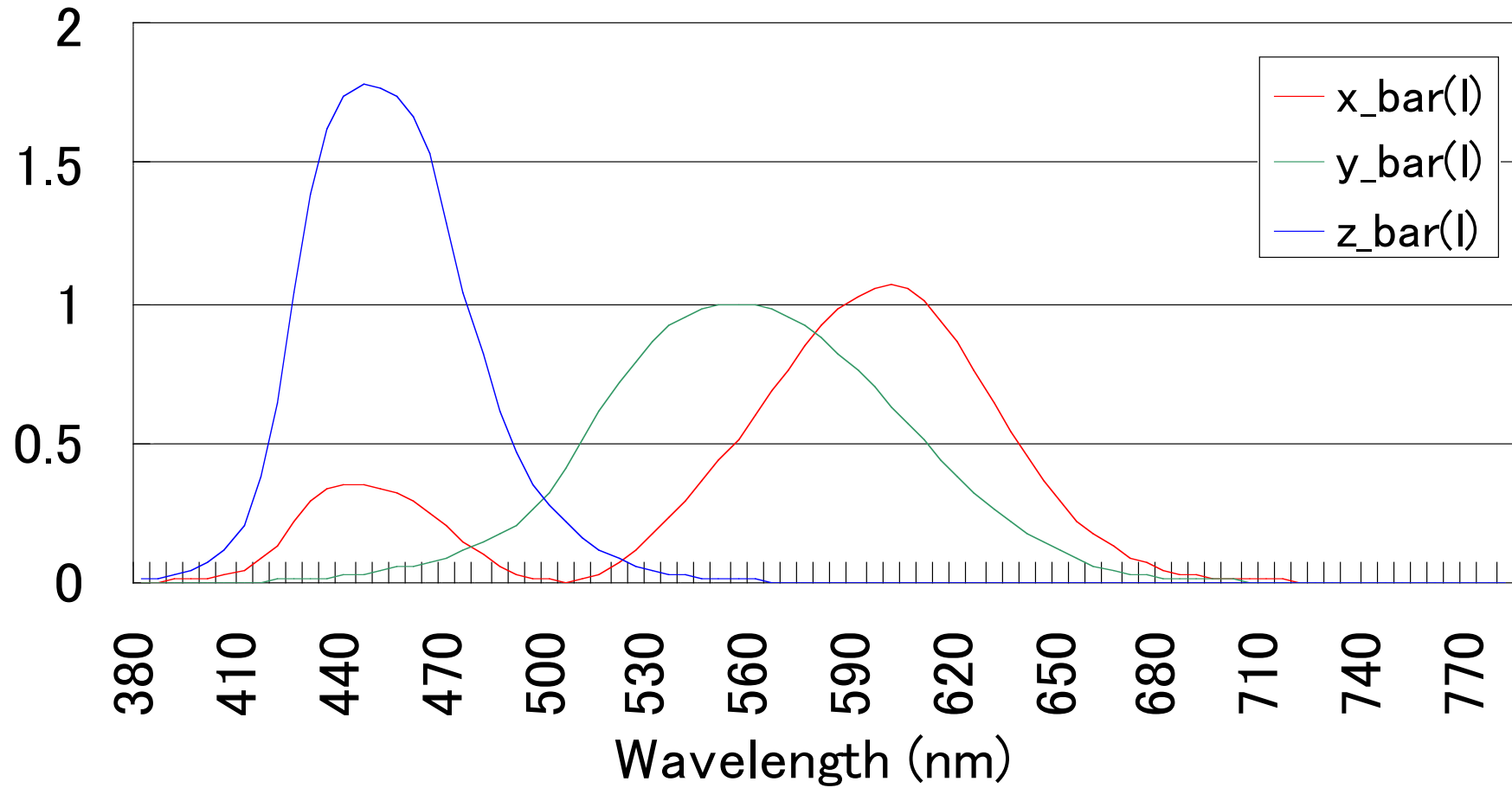


図 4.6 原刺激[X], [Y], [Z]の rg 色度座標

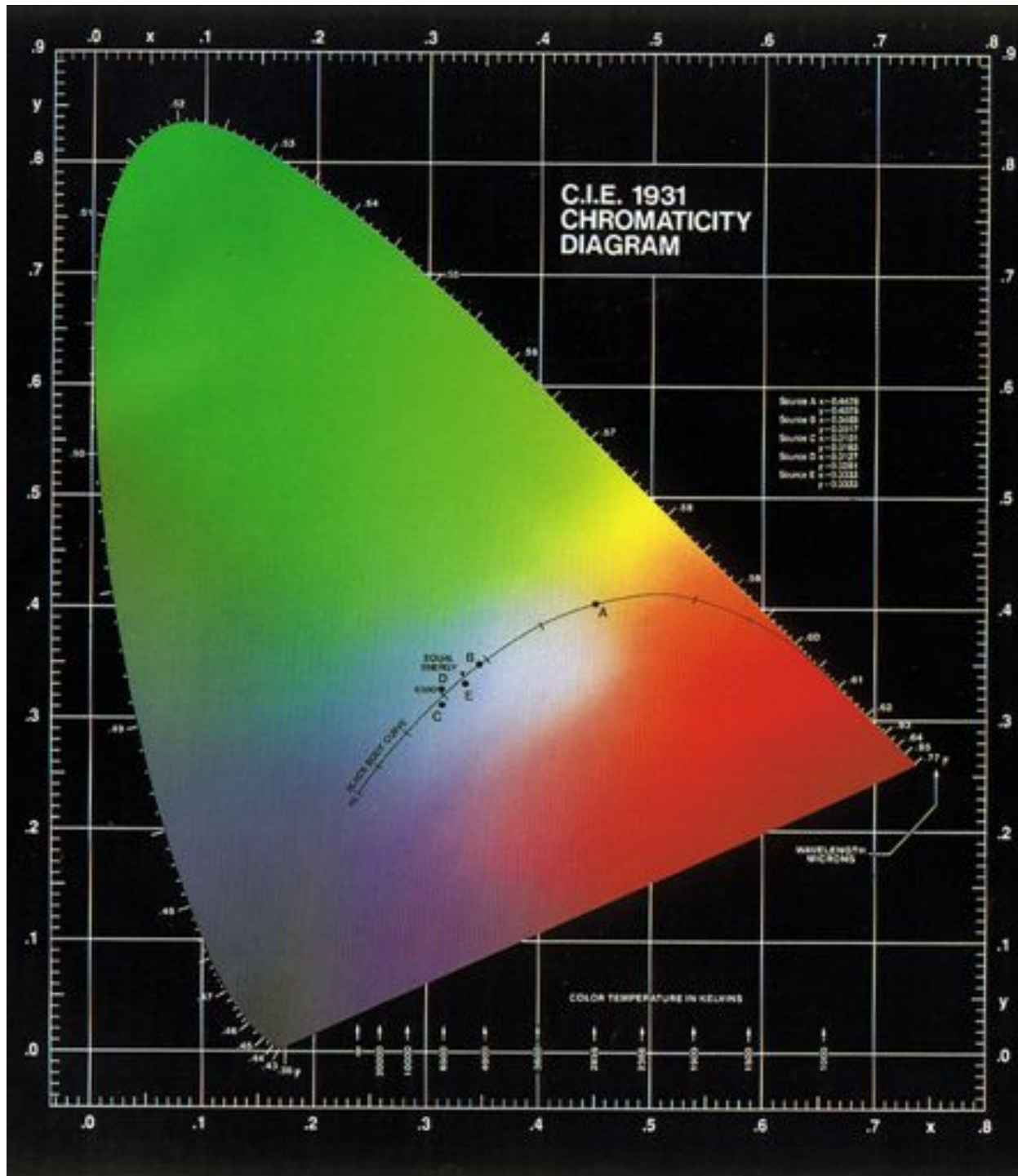
XYZ 等色関数

CIE1931 XYZ等色関数



xy色度図

- XYZの相対値で色を表した座標系を xy 色度座標と呼ぶ
- $x = X/(X+Y+Z)$,
 $y = Y/(X+Y+Z)$
- 中央付近の線は黒体輻射スペクトルの軌跡（色温度に関連）

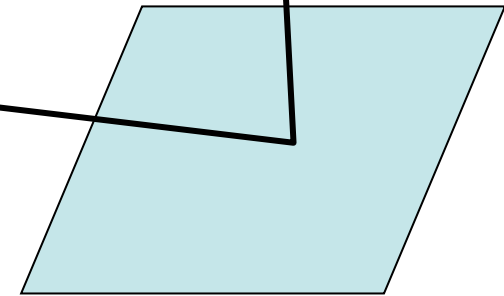


xy色度図と明るさ

一定の明るさの
白色光源



明度



様々な反射率分布の
対象物体

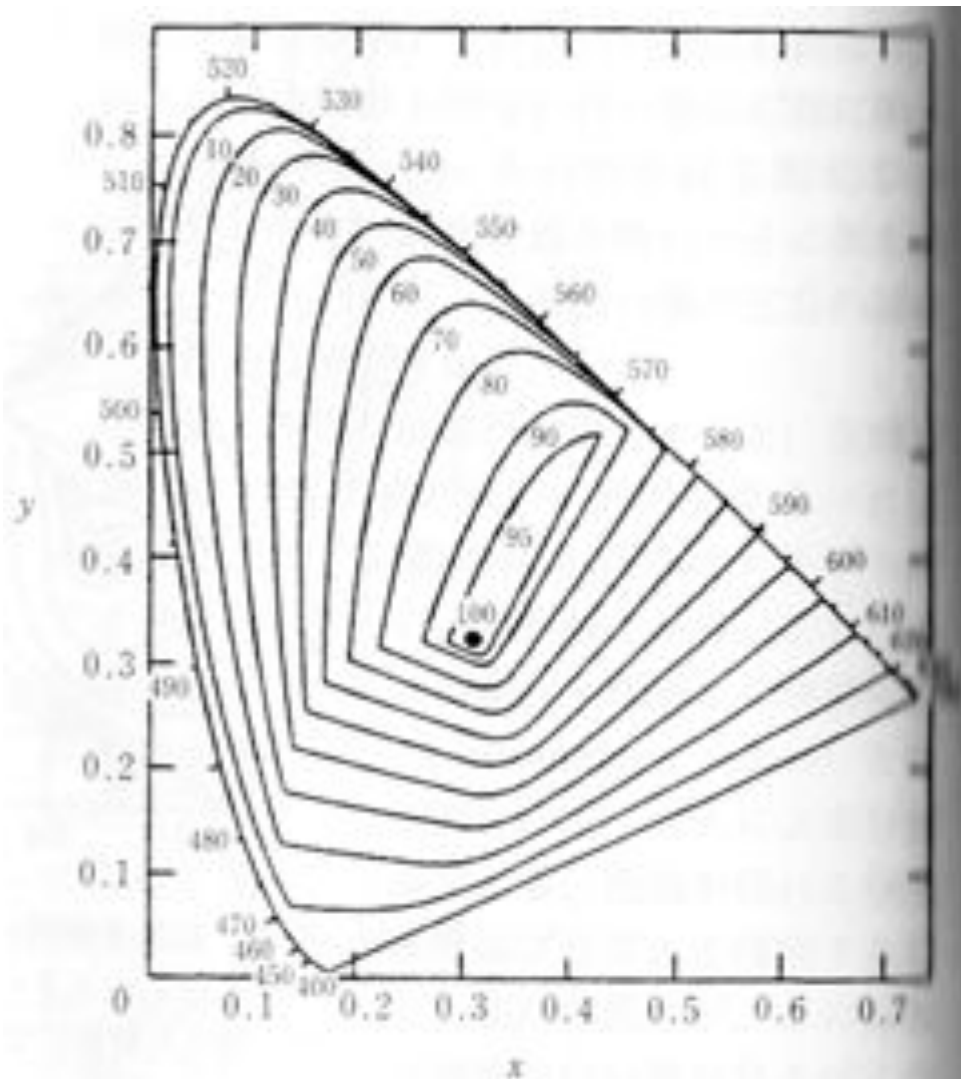
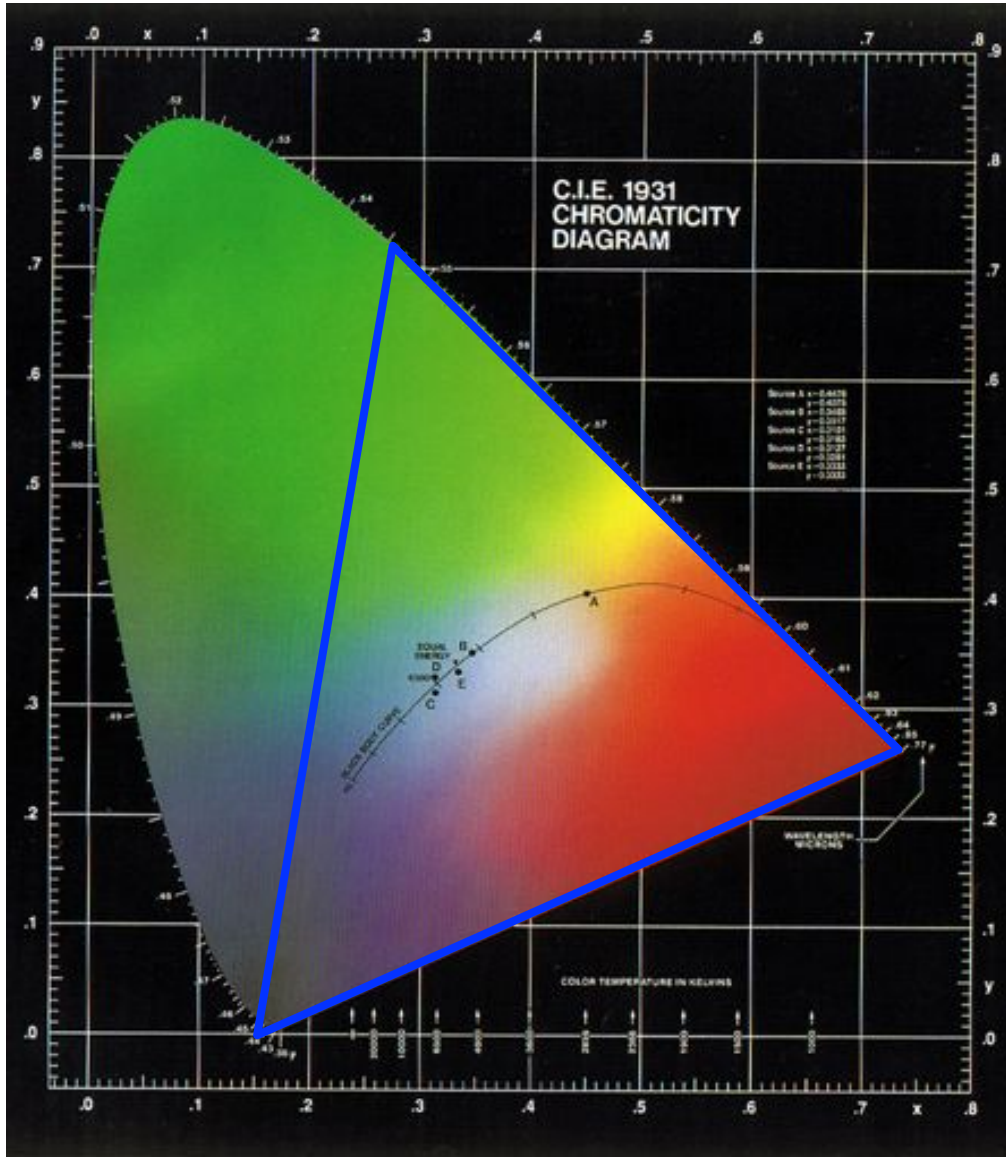


図 4.20 MacAdam 限界の軌跡

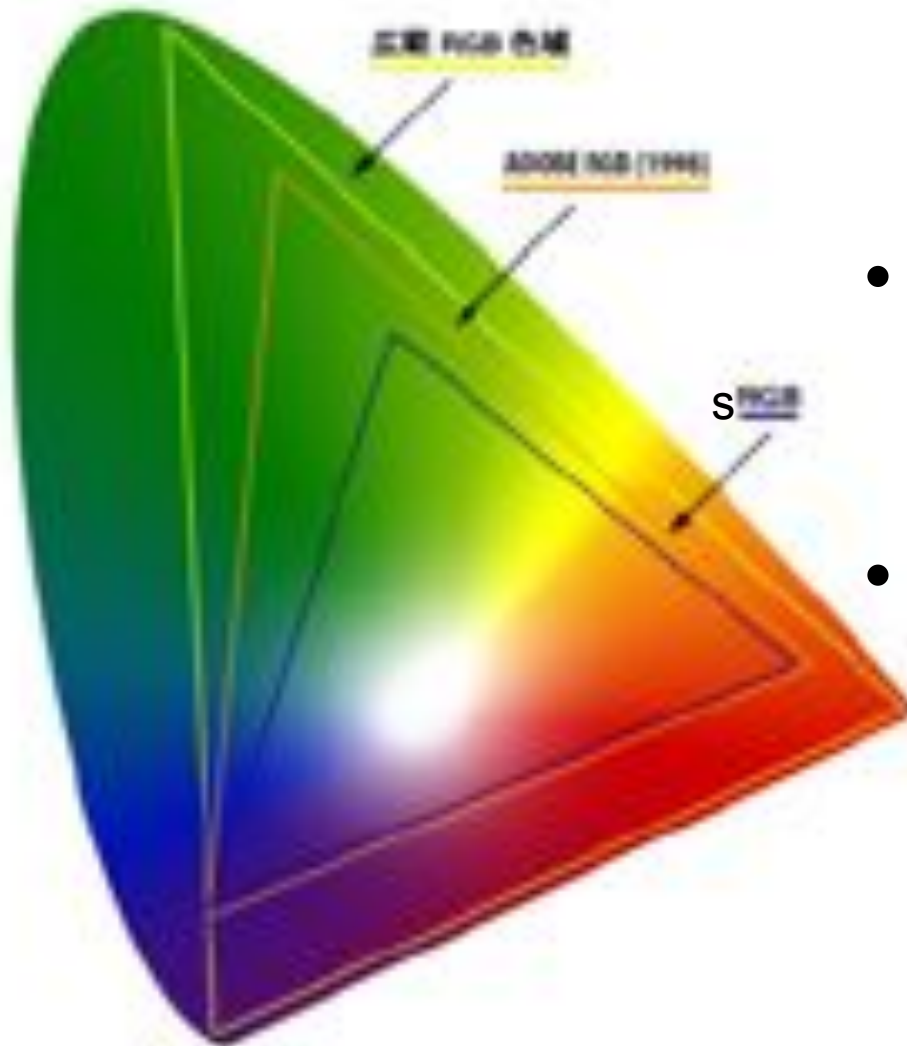
- 反射率は 1.0 を超えることが出来ない
 - 白色が最も明るい
 - xy色度図の図形のふちは明度0(単一スペクトルのため)

色再現と色域(1)



- 3色の混合で色を表すとき, 色度図上の3点の凸包の内部の色しか表現できない (負の明度が存在しないため)
- 色域(gamut)と言う
- 左図は RGB 3刺激 (3つの単スペクトル光)で表すことができる色の範囲

ディスプレイと色再現

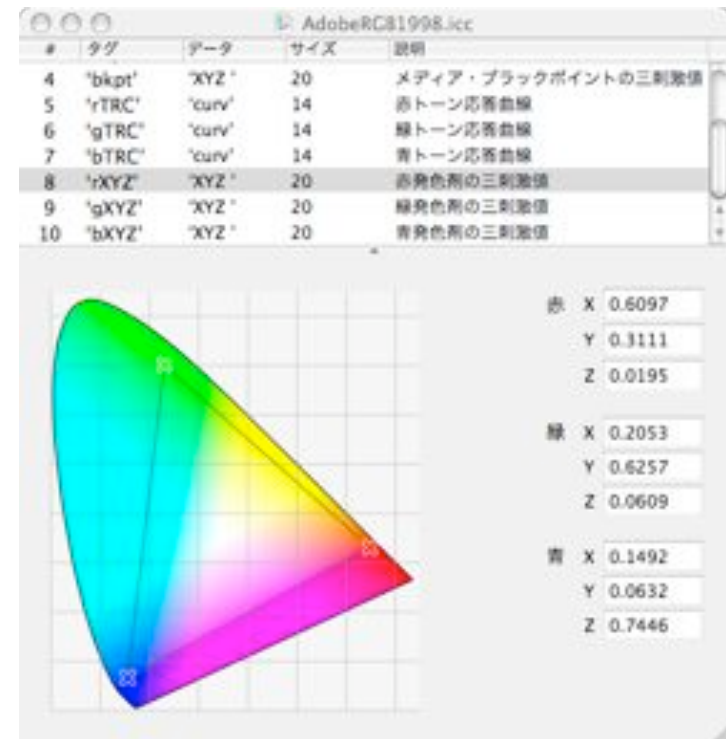


- ディスプレイに用いる蛍光材料によって色の表現範囲が異なる
- PC で用いられる RGB 値は, CIE RGB ではない
- より広い色空間で表現された画像を, 狭い色域のディスプレイで再生すると色がくすんで見える

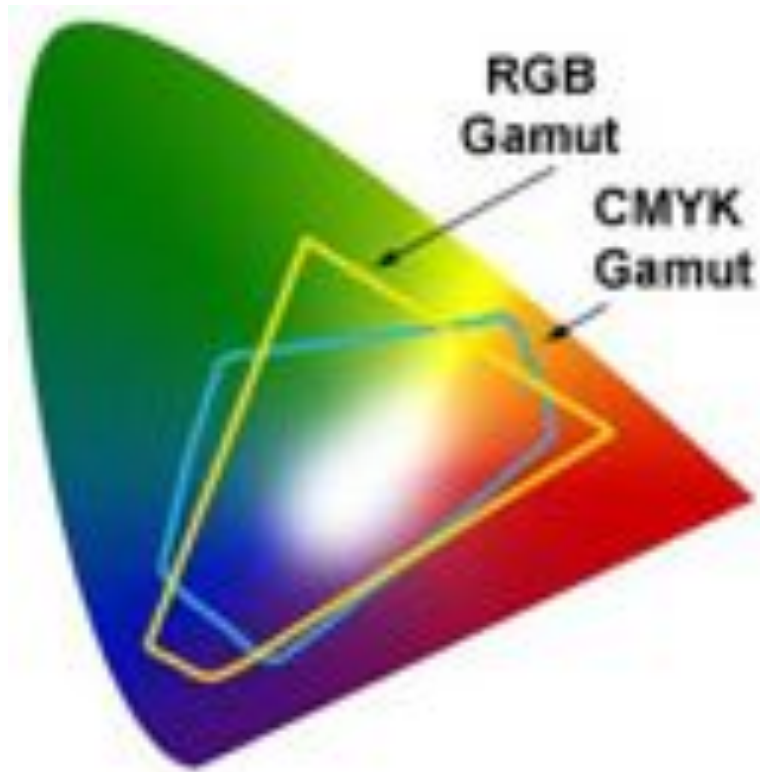
?

参考例

- デジタルカメラの色空間設定の例
- Adobe Photoshop の例
- Apple ColorSync の例
- ディスプレイの例

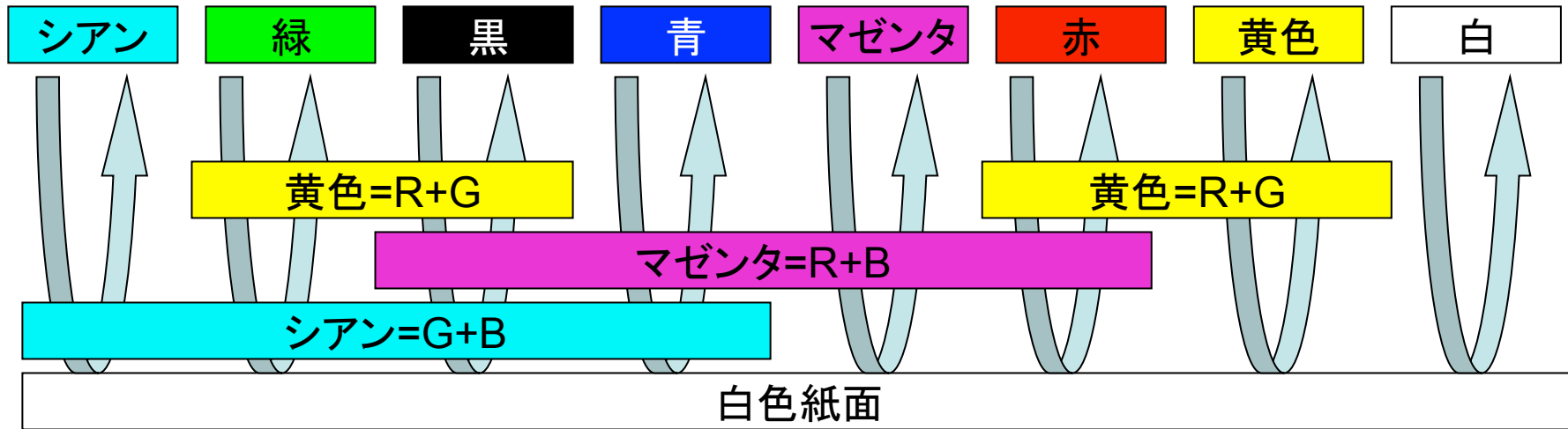


印刷と色再現

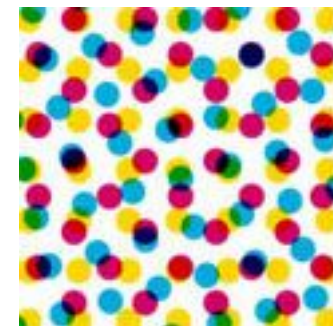


- 印刷は減法混色 (CMY)
- C, M, Y の3座標と, CM, CY, MY の積のスペクトルの計6点の凸包
- RGB と CMYで表現可能な色域はお互いに逸脱がある

印刷



- ・緑の分光反射率 \div 黄色の分光反射率 \times シアンの分光反射率
→緑の分光反射率は黄色やシアンの分光反射率とは一次独立
- ・ハーフトーンは網点により再現される
→上の図に示す8色の加法混色となる



網点

- ・ 近似的に6色の加法混色となる

知覚に即した色空間

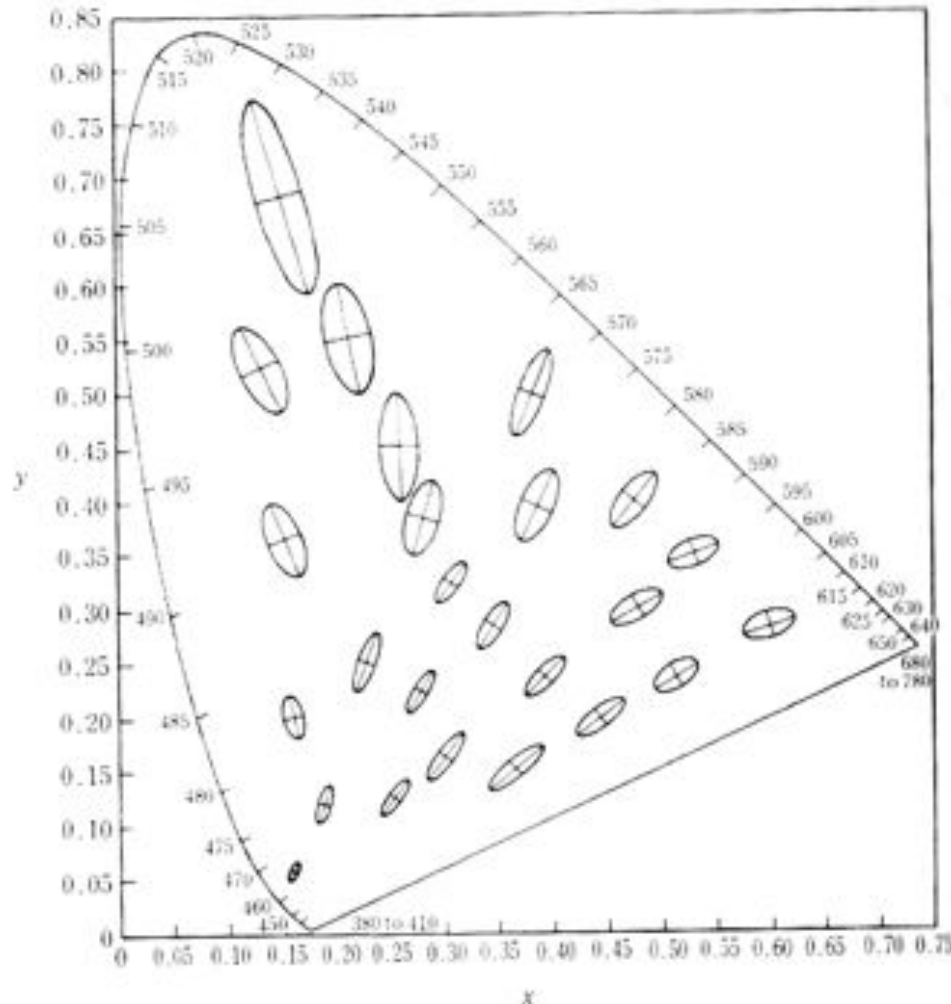


図 4.21 MacAdam の偏差楕円(図は標準偏差の 10 倍の大きさに拡大してある)

- 明度, 色相, 彩度
 - 極座標を用いた色空間
 - HSB (Hue, Saturation, Brightness)
- xy色度座標
 - 知覚的に均等ではない
 - 右図は色の弁別閾の実験例

均等色空間 L*a*b*

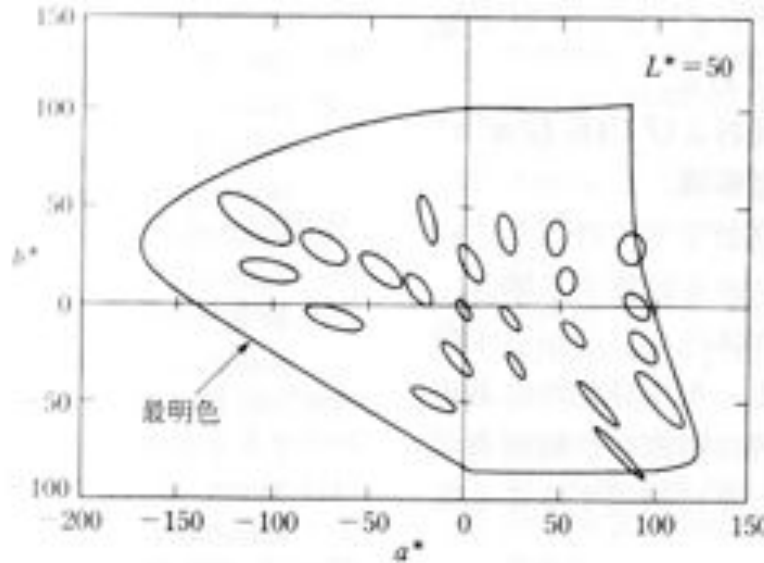
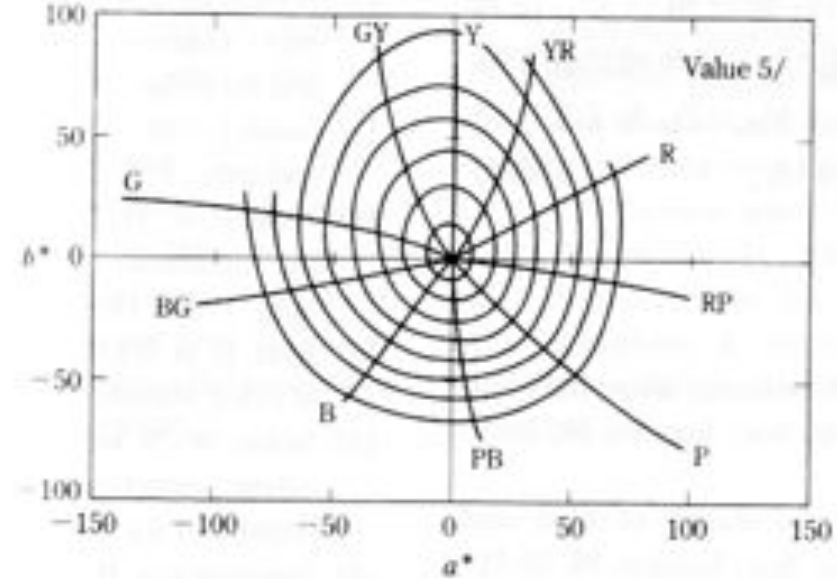


図 4.26 L* = 50 における CIE 1976 a*b* 座標上に置点した MacA 同 4.27 偏差楕円。(Robertson¹⁰⁾, 1977)



マンセル・バリュー 5 の色票の a* 値および b* 値の CIE 1976 a*b* 座標面上への置点。(Robertson¹⁰⁾, 1977)

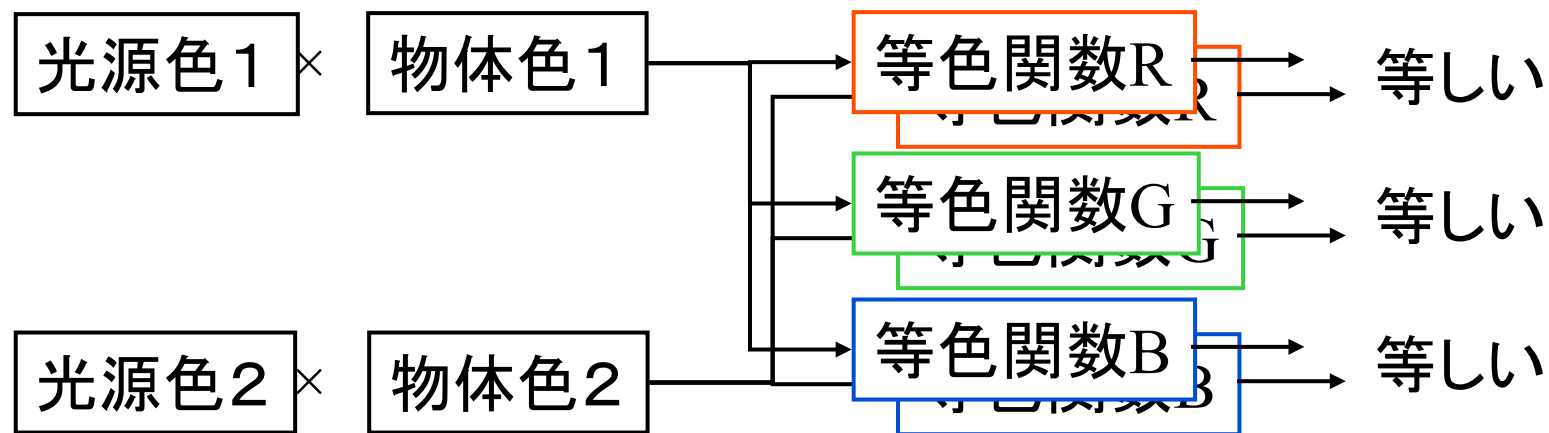
- 非線形変換により、
知覚と距離が比較的
対応した色空間

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right], b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

条件等色(メタメリズム)

- 異なったスペクトル特性の物体が同じ色に見えること



- 物体だけでなく光源にも依存

分光感度と色の評価

- センサの分光感度が人と異なると、人が見て等色のもの(条件等色の物体)が**異なった色**として計測される
- 光源の**演色性**により、等色と判断された物体が太陽光下で異なった色に見えることがある(熱光源の場合、スペクトル特性がなだらかなため、あまり問題は発生しない)

心理 vs. 物理

- 心理
 - 人間の視覚はどのようになっているのだろうか？
 - 人間と同じ結果・出力を生じるものを作りたい
- 物理
 - 高精度な形状計測や色マーカ識別システムを作りたい
 - 対象物体の材質を色で明らかにしたい
- では、この問題は？
 - 紙やプラスチックの外観品質管理システム
 - 農作物の品質評価システム