

第1回

「生物機械計測学」  
自然界の色のしくみと太陽の放射特性  
—なぜ夕焼けは赤いか？なぜ葉は緑か？—

農学研究科 地域環境科学専攻  
近藤 直

授業の目的:色のしくみ、表現方法を学び、自然界に発生する色の理由を理解する。さらに、色を計測する方法を学ぶ。



**KYOTO** 京都大学  
UNIVERSITY

# 生物機械計測学

(Plant measurement)

授業のキーワード:

自然 (Nature)

工学 (Engineering)

計測 (Measurement)

植物 (Plant)

光 (Light)

色 (Color)

画像 (Image)

力学的特性 (Mechanical property)

物理的特性 (Physical property)

ロボット (Robot)



KYOTO

京都大学  
UNIVERSITY

# 授業の目的

現代は、規格化された工業製品だけでなく、自然界の植物、動物をも計測したり、制御・生産する時代である。本授業では、複雑で多様な自然現象および植物の挙動等に内在する法則、現象を理解すると同時に、生物を対象に種々の項目を計測する装置およびその原理、構成、仕組みなどを習得することを目的とする。



## 授業の到達目標

1. 自然界における工学的計測に関わる用語, 知識を幅広く身に着けること。
2. 植物の成長, 挙動に関連する特性およびルールが理解できるようになること。
3. 画像および種々の計測システムの仕組みが理解できるようになること。

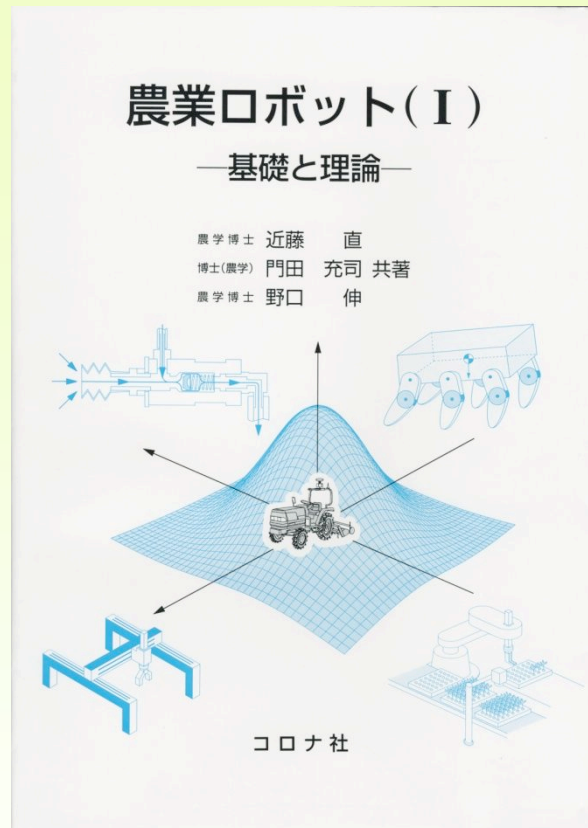


# 授業の内容・スケジュール

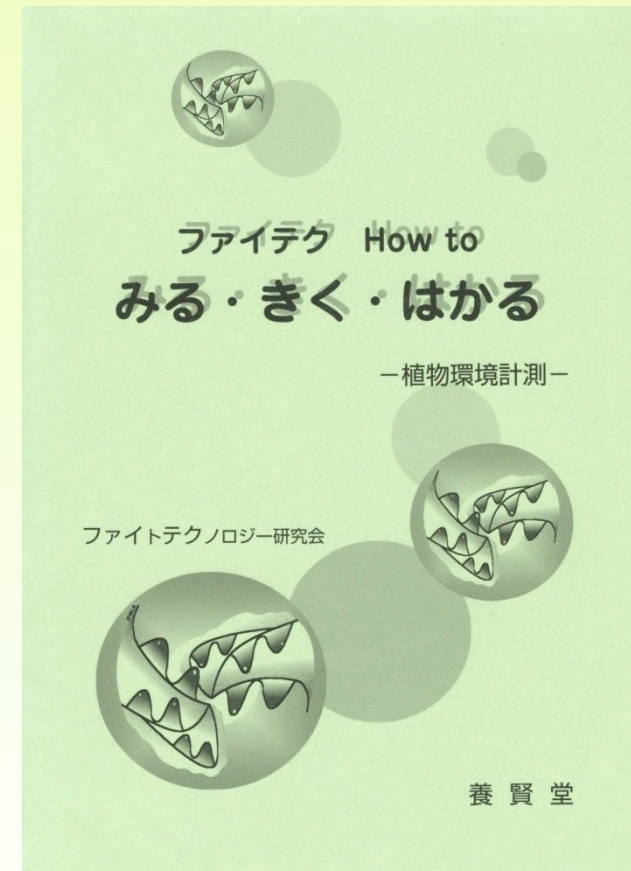
1. 自然界の色のしくみと太陽の放射特性 —なぜ夕焼けは赤いか？—
2. マシンビジョンシステムとは？ —色の計測—
3. 照明の基礎, 光および電磁波の分類とその特徴 — $\gamma$ 線からテラヘルツまで—
4. 生物の光反射特性 —可視, 赤外, 紫外領域を中心に—
5. 画像処理手法の基礎(1)(PCを用いた実習:S-284室)
6. 画像処理手法の基礎(2)(PCを用いた実習:S-284室)
7. 画像処理手法の基礎(3)(PCを用いた実習:S-284室)
8. 人間の目, 昆虫の目, 機械の目
9. 自然界の形状の規則性とその計測方法
10. 生物材料の物理的特性の計測
11. 近赤外による非破壊計測と土壌の計測
12. 種々のセンサと計測システム



# 教科書と参考書



(株) コロナ社  
「農業ロボット(I)ー基礎と理論ー」  
(近藤 直他編)



(株) 養賢堂  
「ファイテック How to みる・きく・はかる」  
(ファイテックテクノロジー研究会編)



# 授業、質問等について

講義の終わりにレポートを出し、次の講義時に回収する。

オフィスアワー: 居室にいるときであれば、随時

E-mail: [kondonao@kais.kyoto-u.ac.jp](mailto:kondonao@kais.kyoto-u.ac.jp)

居室: 農学部総合館, S-252



**KYOTO**

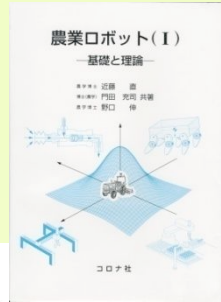
京都大学  
UNIVERSITY



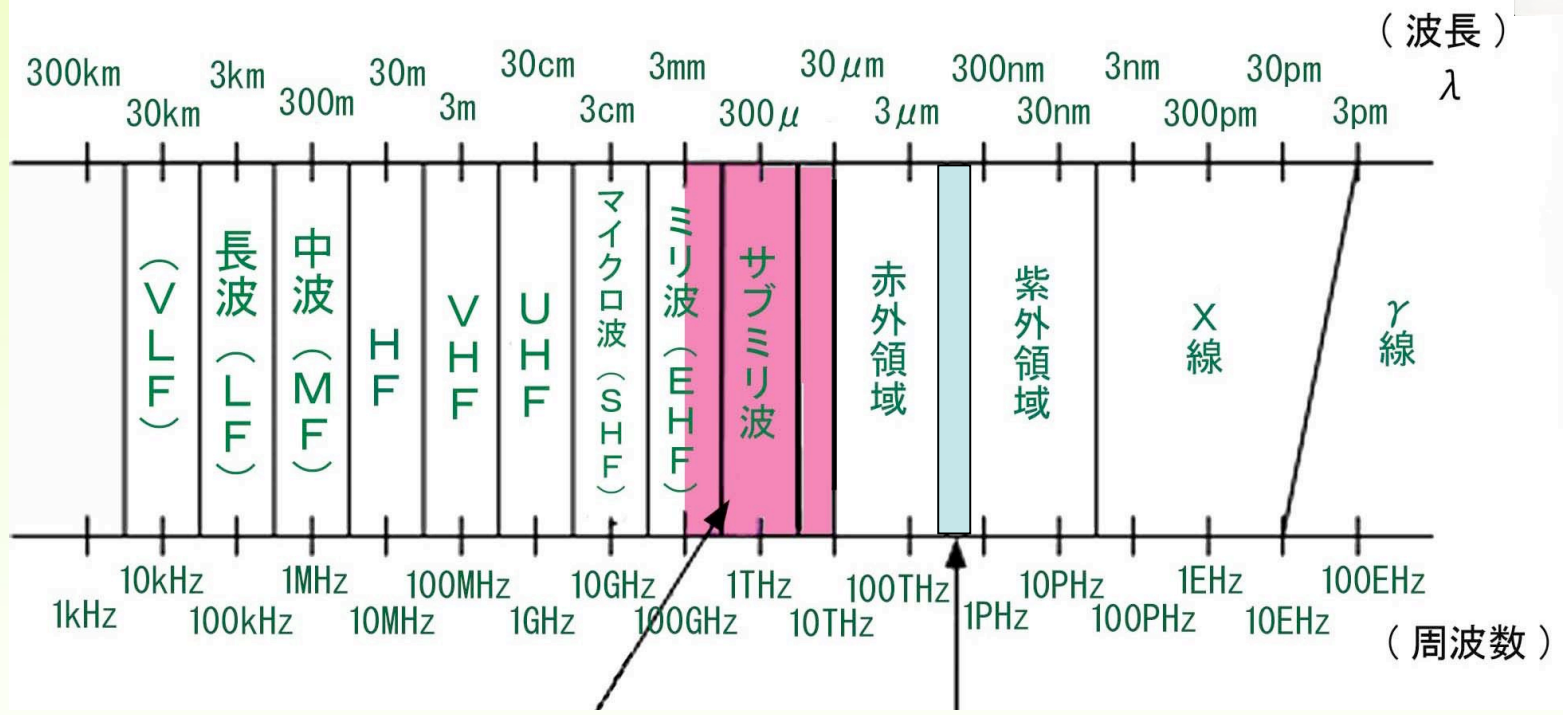
種々の農産物の色



# 色とは？



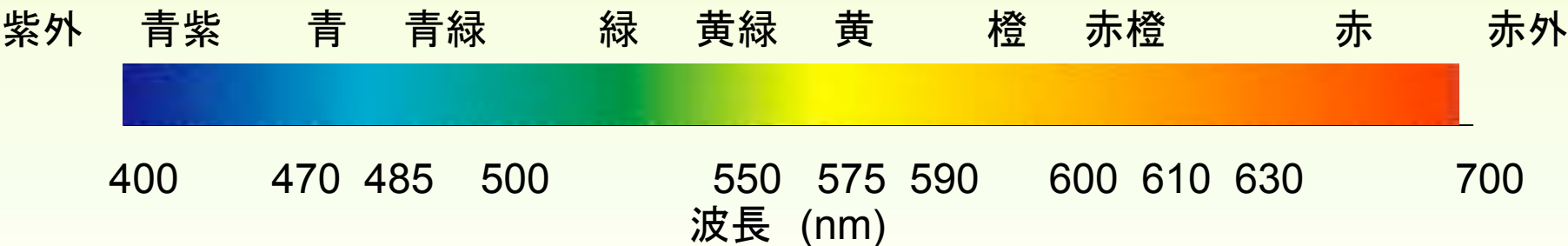
P.12



テラヘルツ帯 可視領域



# 可視領域



赤紫 紫

495c 530c 570c

← 赤と青との混合された紫色

[http://www.icoffice.co.jp/zukan/l\\_optical.htm](http://www.icoffice.co.jp/zukan/l_optical.htm)より一部抜粋

## 色の三属性

**色相**: 赤、橙、黄、緑、青、紫などという色味、色合い(Hue)

**明度**: 色の明るさ、白が最も明るく、黒が最も暗い  
(Lightness, Intensity)

**彩度**: 色の鮮やかさ、色の冴え方、白、灰、黒は彩度0  
(Saturation, Purity)

## 色の表現方法

マンセル記法

色度

$L^*a^*b^*$

HSI



KYOTO

京都大学  
UNIVERSITY

# マンセル記法 (Albert H. Munsellによって創案)

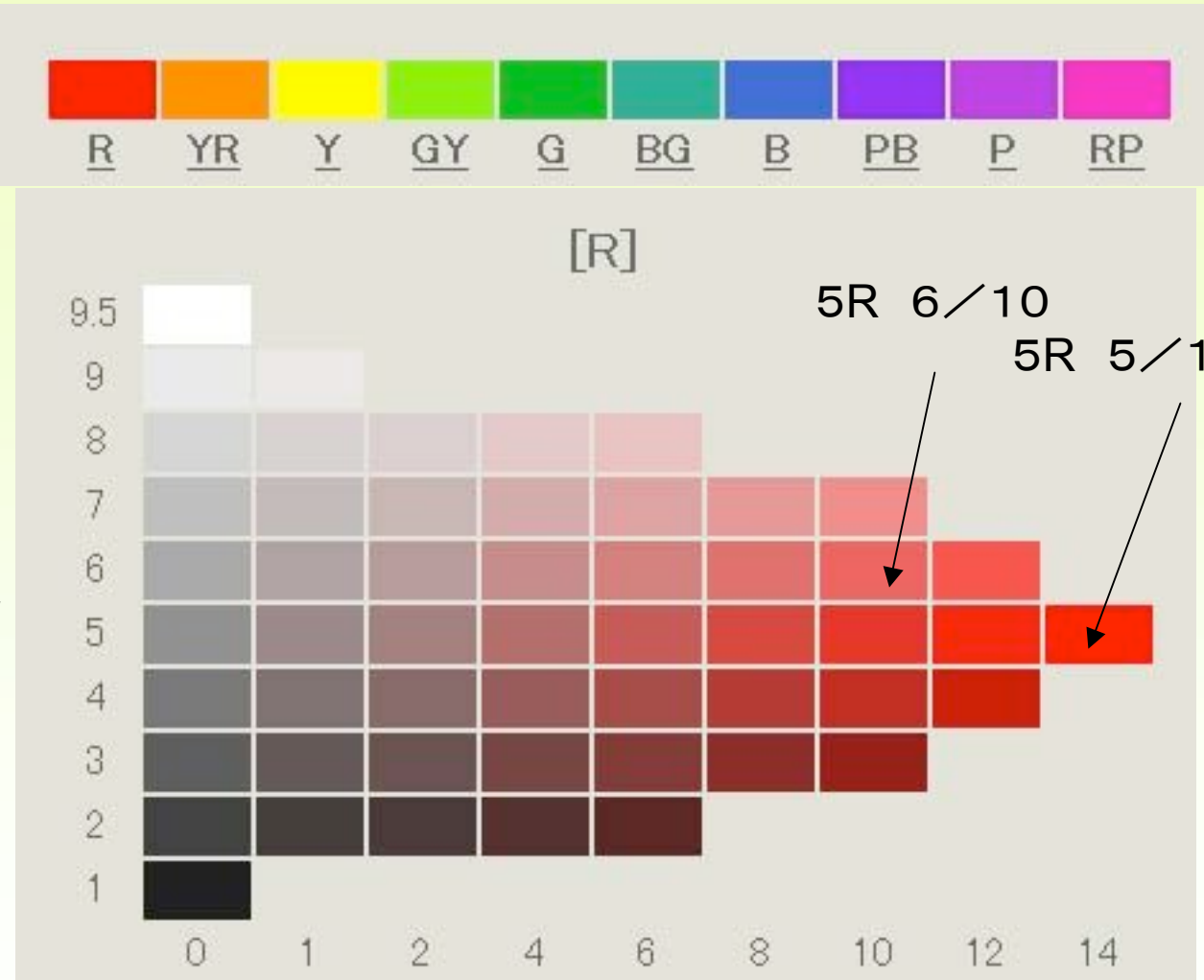
色相



主色: 赤、黄、緑、  
青、紫  
その間の5色と合  
わせて10色  
さらに各色10分割

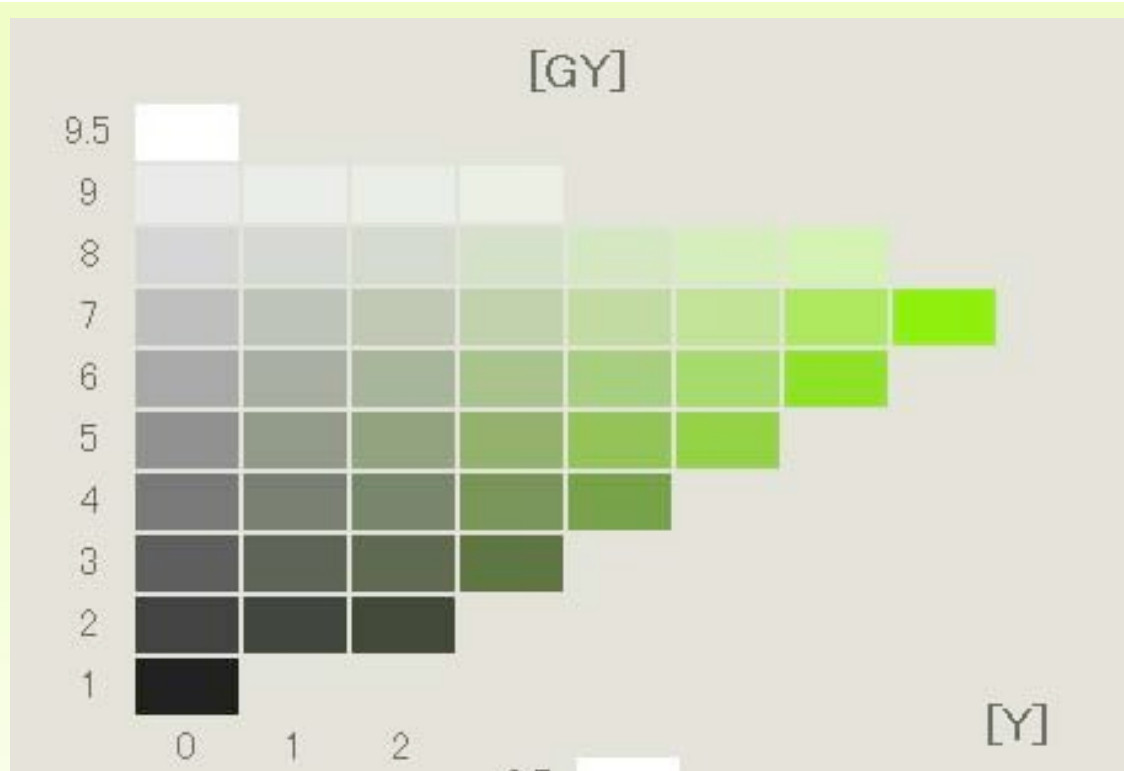
明度

完全な黒: 0  
完全な白: 10

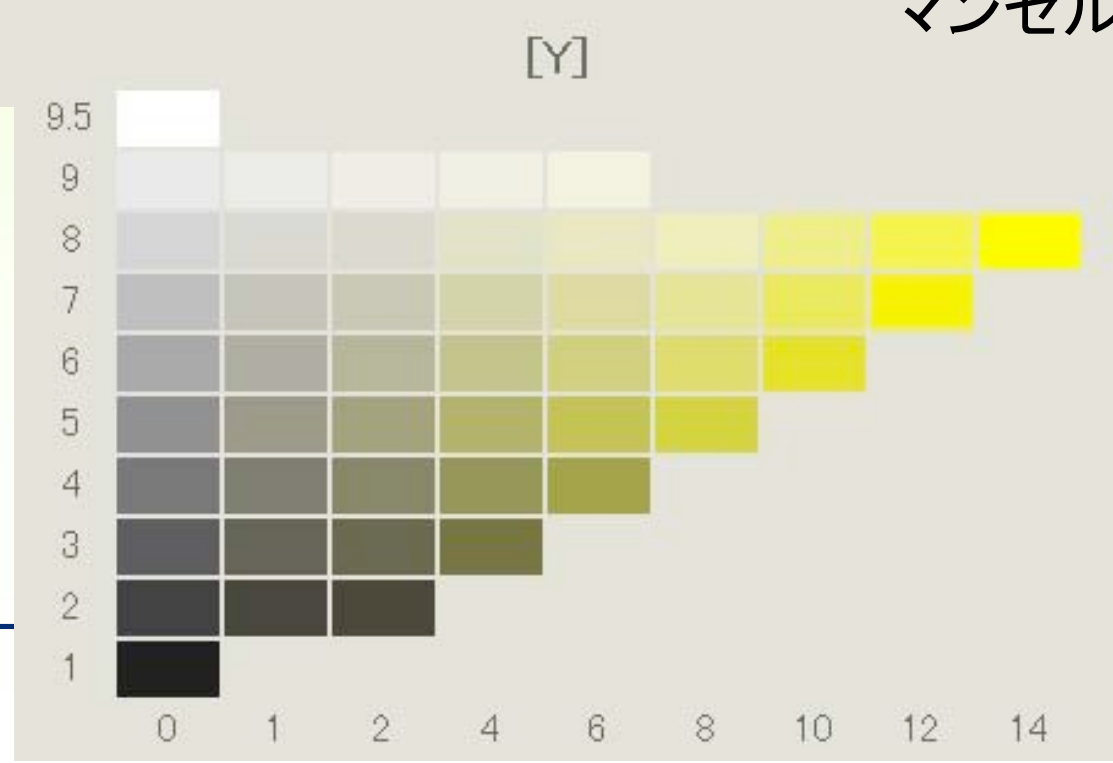


彩度

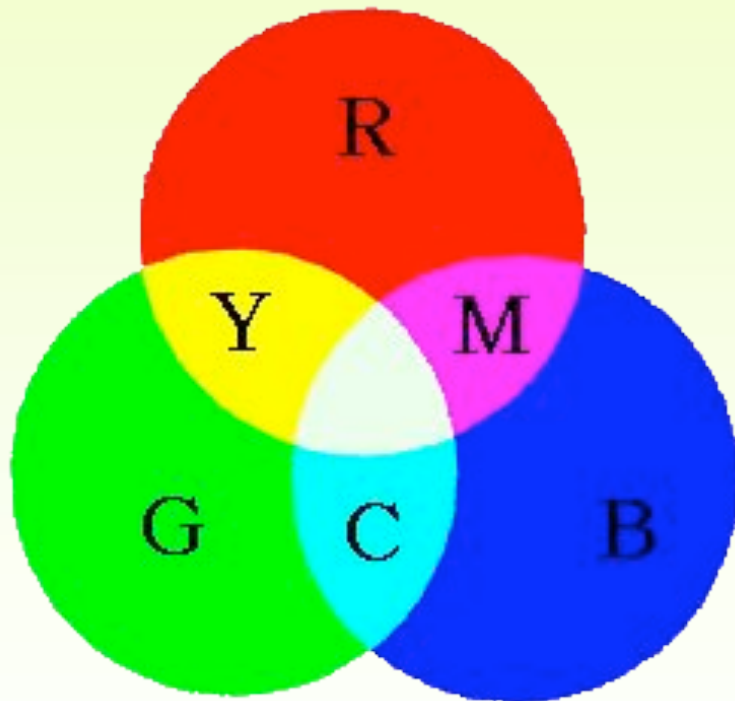




マンセル色立体



# 光の三原色 RGB



赤R、緑G、青Bを光の三原色と呼びます。光の三原色は色素系(絵の具やインク等)の三原色とは違います。簡単に言えば赤、青、緑の絵の具を重ねると黒になってしまうのに対して光だと白になります。

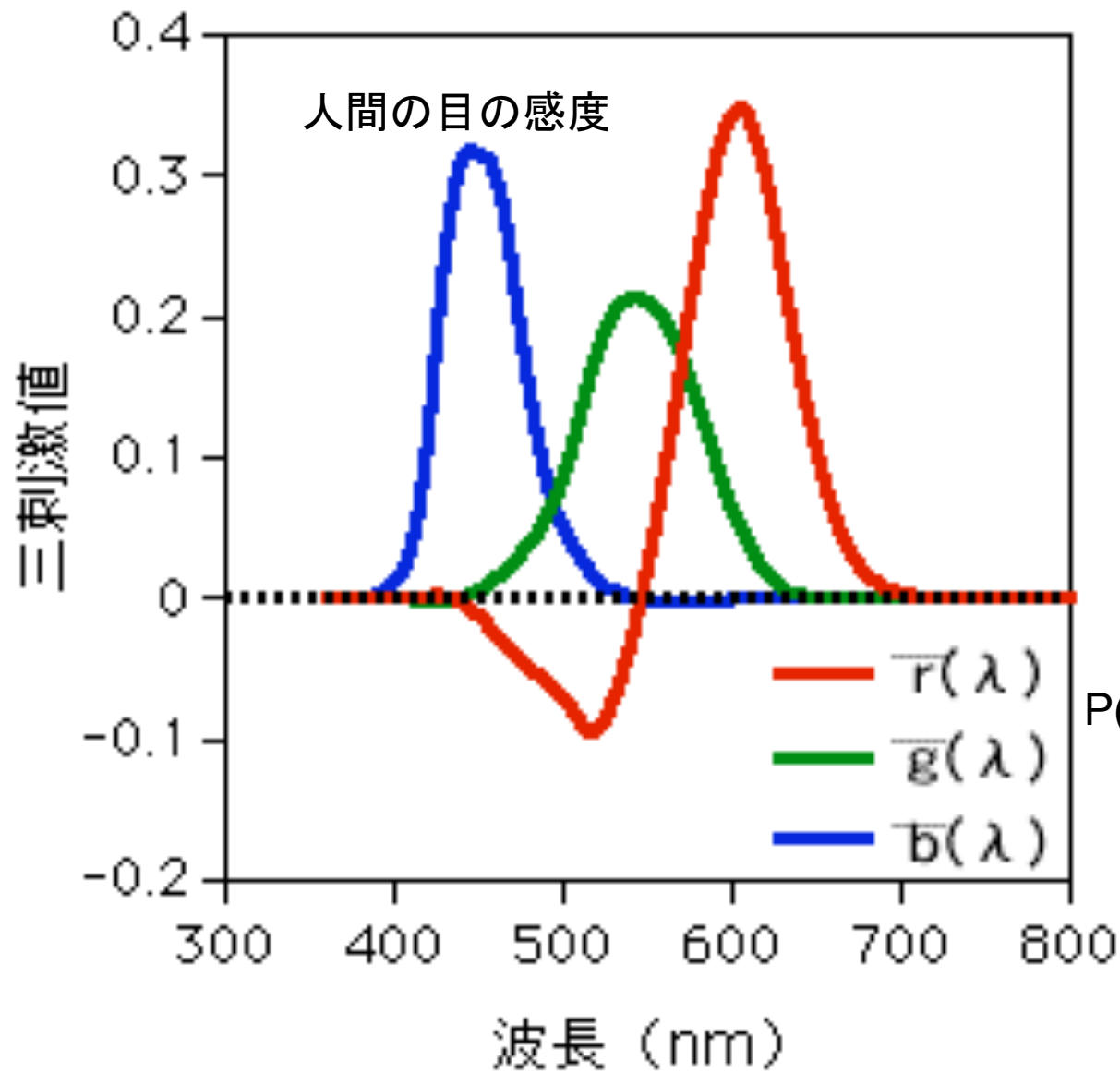
赤と緑が重なると黄色Yに、緑と青が重なるとシアンCに、青と赤が重なるとマゼンタMになります。そして赤、青、緑が重なると白になります。

補色の関係  
R-C  
G-M  
B-Y





P.41



三刺激値

$$R = \sum P(\lambda) r(\lambda) \Delta\lambda$$

$$G = \sum P(\lambda) g(\lambda) \Delta\lambda$$

$$B = \sum P(\lambda) b(\lambda) \Delta\lambda$$

$P(\lambda)$  : 波長におけるエネルギー

輝度

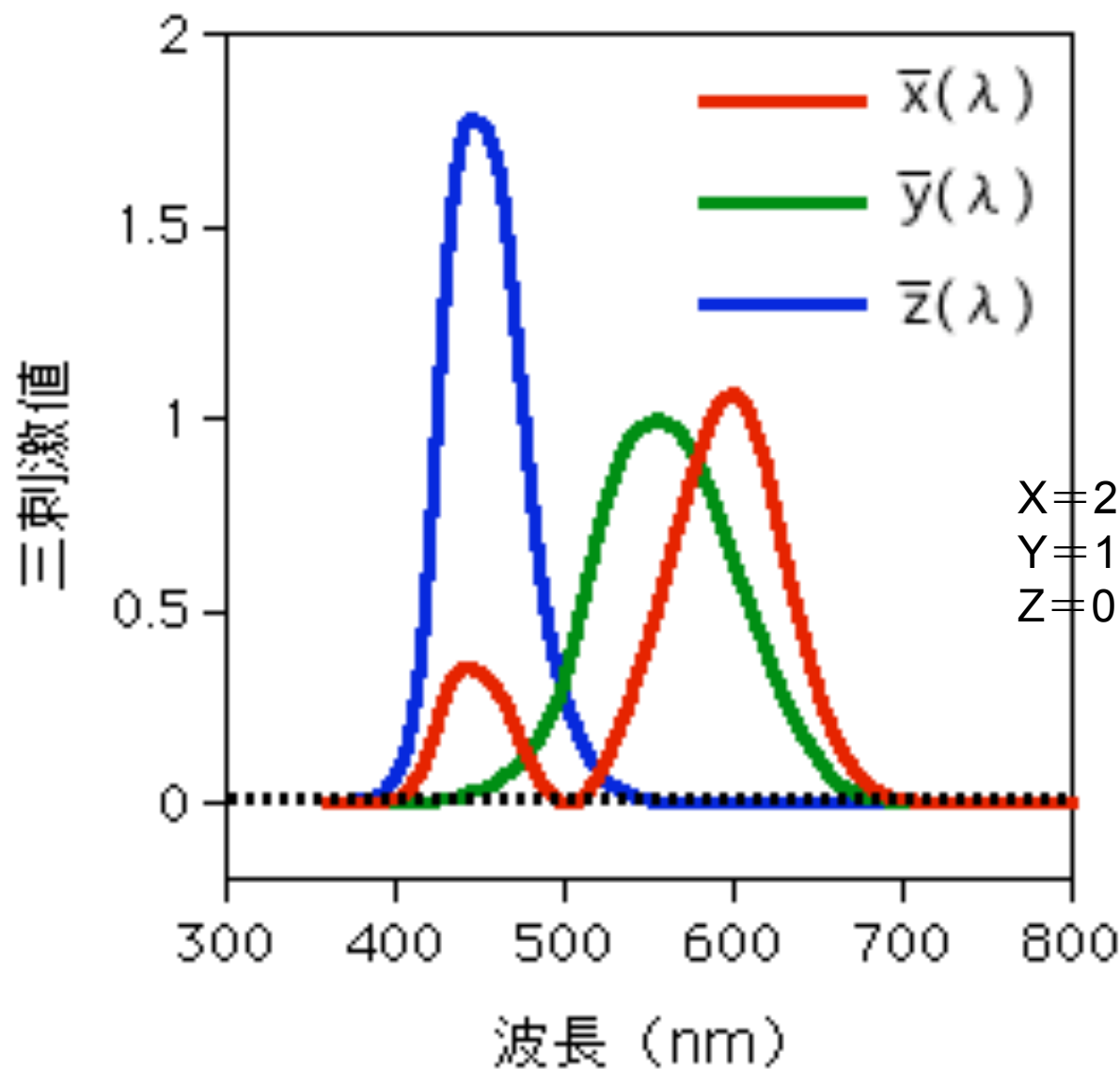
$$Y = R + 4.5907G + 0.0601B$$

## RGB表色系の等色関数



KYOTO

京都大学  
UNIVERSITY



$$X = 2.7690R + 1.7517G + 1.1301B$$

$$Y = 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B$$

$$Z = 0.0000R + 0.0565G + 5.5943B$$

輝度: Y

## XYZ表色系の等色関数

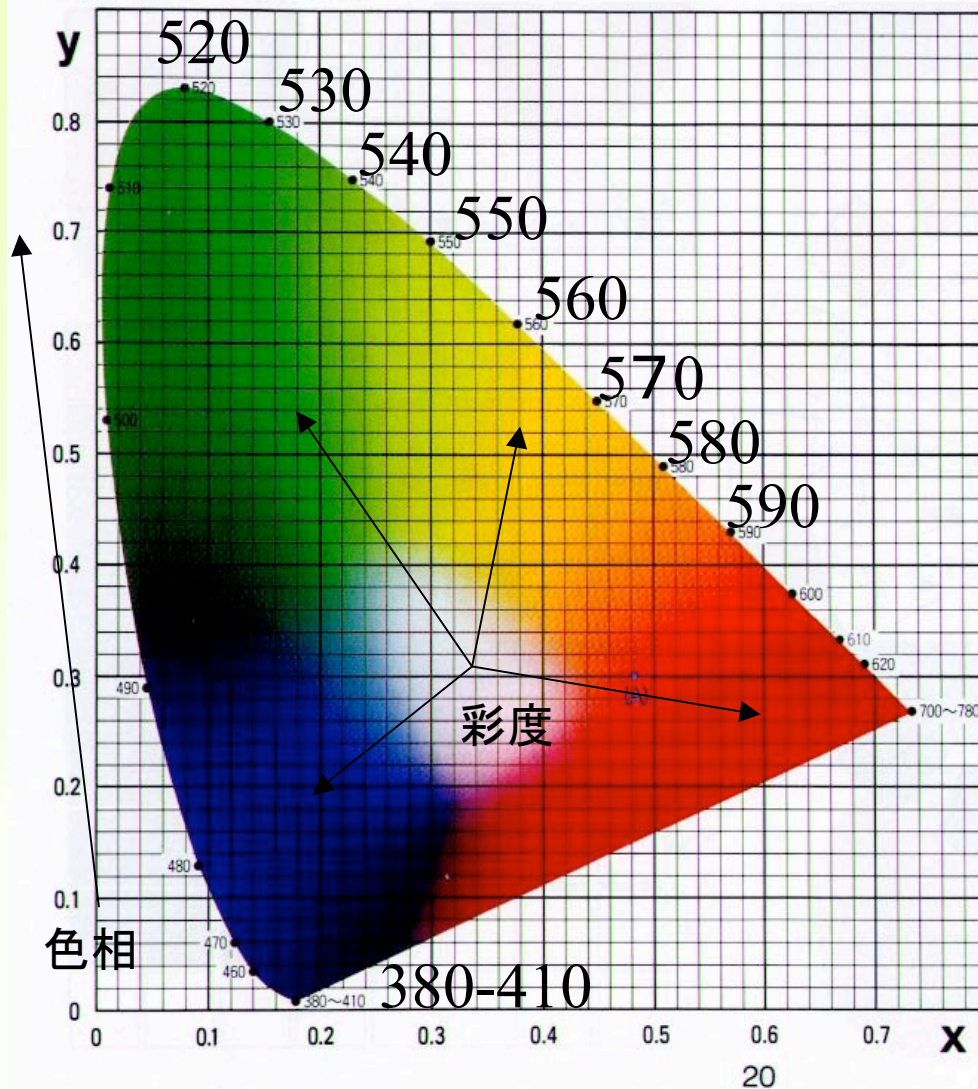






P.43

図12 XYZ表色系色度図



色度

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$z = Z / (X + Y + Z) = 1 - x - y$$

700-780

XYZ表色系色度図

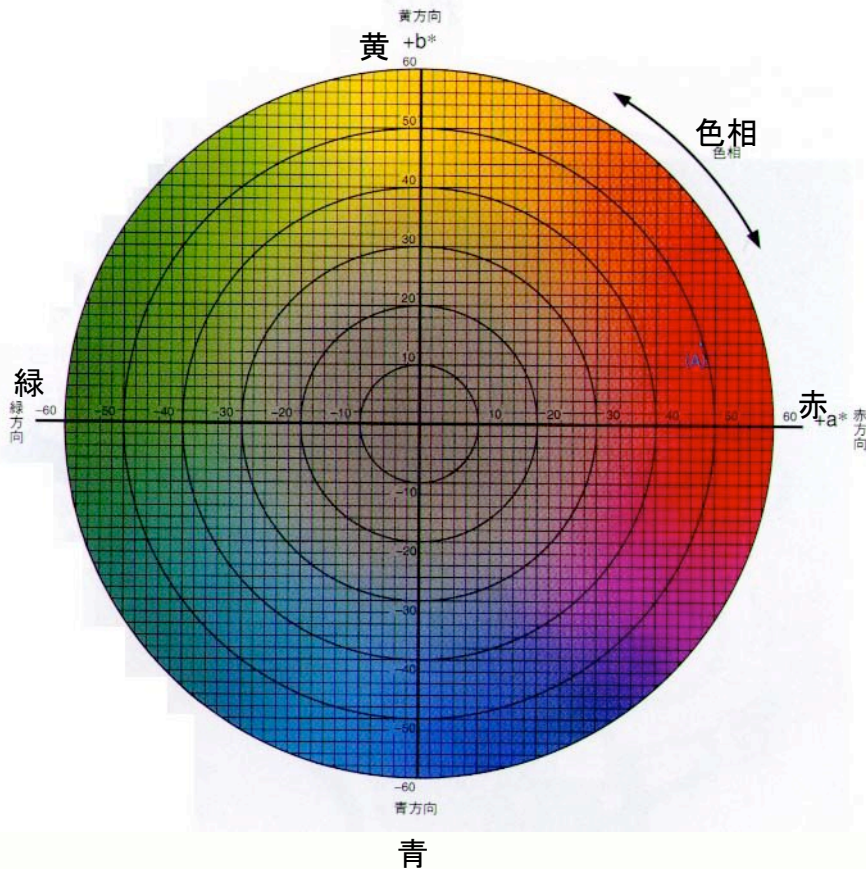


KYOTO

京都大学  
UNIVERSITY

# 均等色空間

図6 L\*a\*b\*表色系色度図  
(色相と彩度)



P.45

人間の色感覚にあった色度図  
人間の明るさの感覚にあった明度関数  
を組み合わせ、3次元空間にしたもの

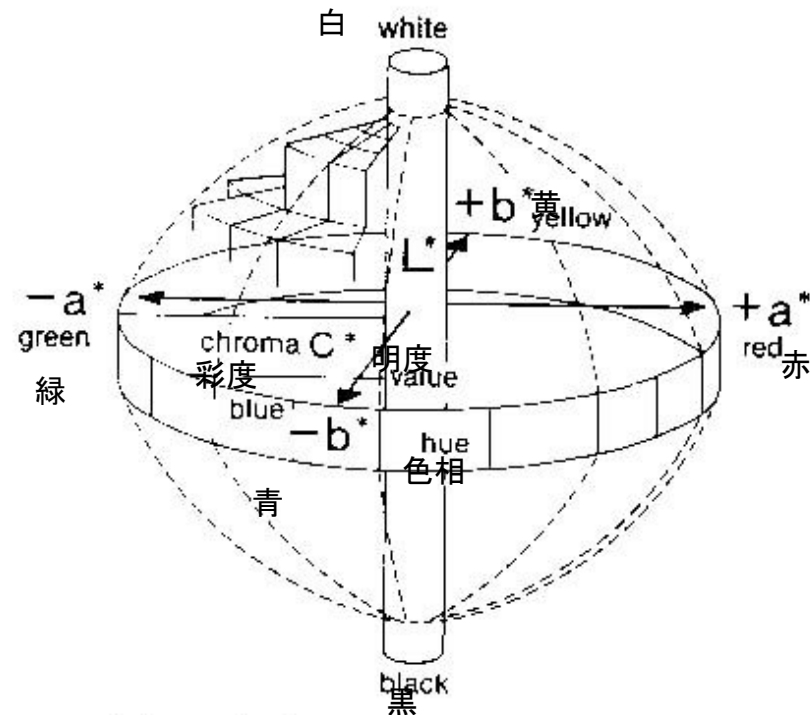


図2 L\*a\*b\*表色系のカラー・チャート

L\*a\*b\*表色系

# XYZ表色系からL\*a\*b\*表色系への変換式



P.44

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 [ (X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3} ]$$

$$b^* = 200 [ (Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3} ]$$

X、Y、ZはXYZ表色系の三刺激値

$X_n$ 、 $Y_n$ 、 $Z_n$ は標準照明 (D65) における白基準値の三刺激値

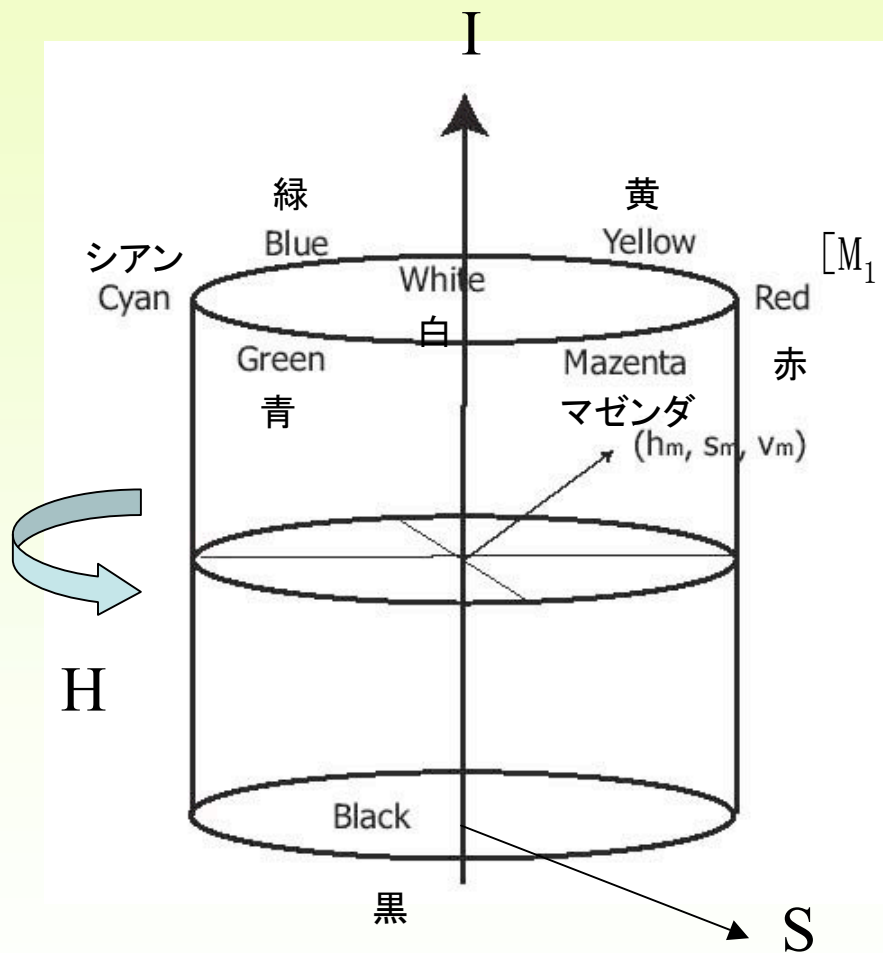
( $X_n = 0.95045$ ,  $Y_n = 1.0$ ,  $Z_n = 1.08892$ )



# HSIの円柱モデル



P.45



$$[M_1 \ M_2 \ I_1] = [R_T \ G_T \ B_T] \begin{vmatrix} 2/\sqrt{6} & 0 & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{3} \end{vmatrix}$$

$$M_1 = (2/\sqrt{6}) R_T - (1/\sqrt{6}) G_T - (1/\sqrt{6}) B_T$$

$$M_2 = (1/\sqrt{2}) G_T - (1/\sqrt{2}) B_T$$

$$I_1 = (1/\sqrt{3}) R_T + (1/\sqrt{3}) G_T + (1/\sqrt{3}) B_T$$

$$H = \arctan(M_1/M_2)$$

$$S = (M_1^2 + M_2^2)^{1/2}$$

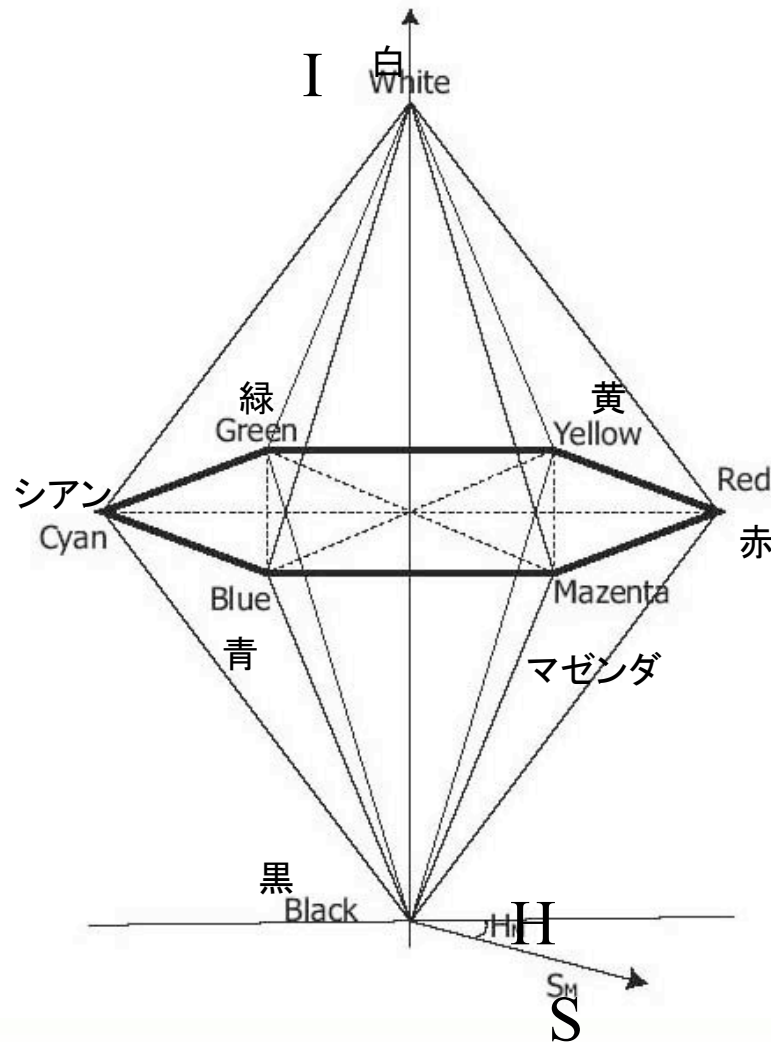
$$I = \sqrt{3} I_1$$



# 六角錐モデル



P.45



明度

$$I = (I_{\max} + I_{\min}) / 2$$

$$I_{\max} = \max \{R_T, G_T, B_T\}, \quad I_{\min} = \min \{R_T, G_T, B_T\}$$

彩度

$$S = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (I \leq 0.5 \text{ のとき})$$

$$S = (I_{\max} - I_{\min}) / (2 - I_{\max} - I_{\min}) \quad (I > 0.5 \text{ のとき})$$

色相

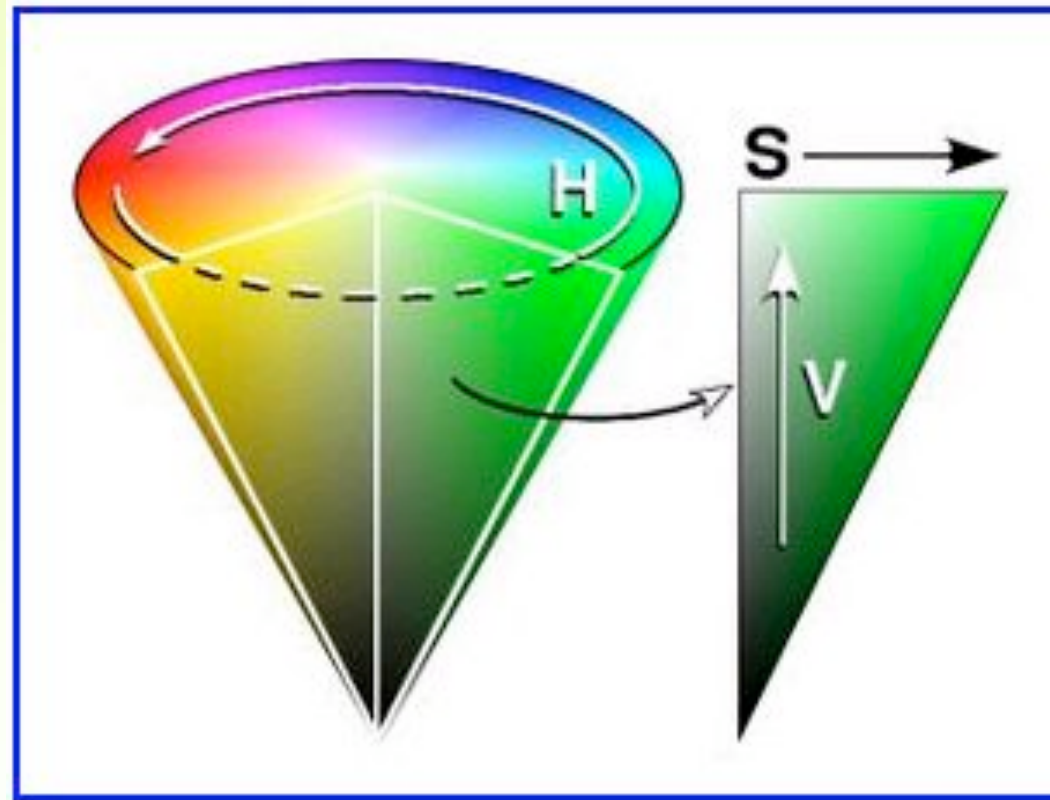
$$H = \pi (b - g) / 3 \quad (I_{\max} = R_T \text{ のとき})$$

$$H = \pi (2 + r - b) / 3 \quad (I_{\max} = G_T \text{ のとき})$$

$$H = \pi (4 + g - r) / 3 \quad (I_{\max} = B_T \text{ のとき})$$



# HSV



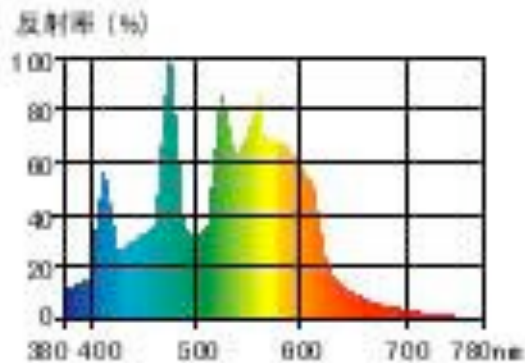
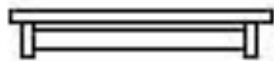
出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』



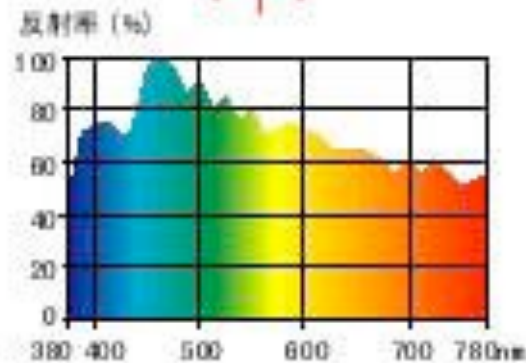
**KYOTO** 京都大学  
UNIVERSITY

# 光源の分光分布

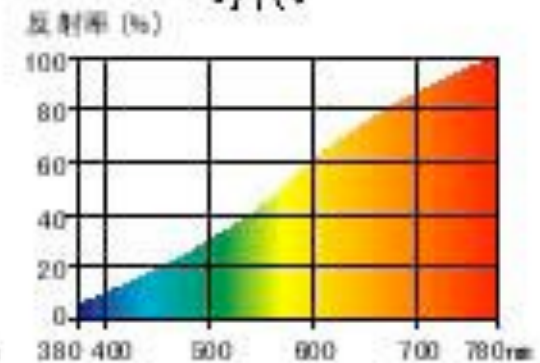
白色蛍光灯の分光分布

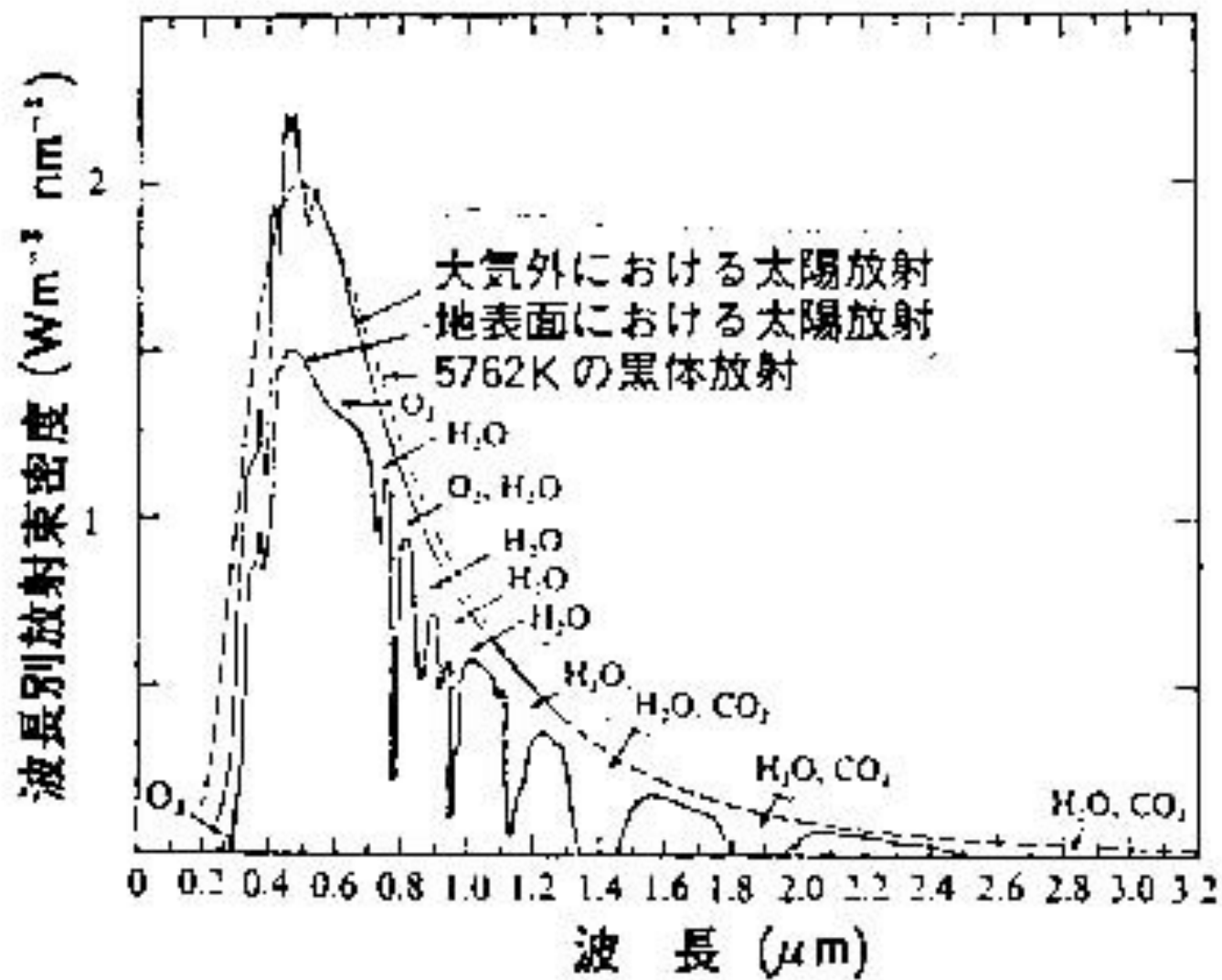


昼光の分光分布



白熱電球の分光分布



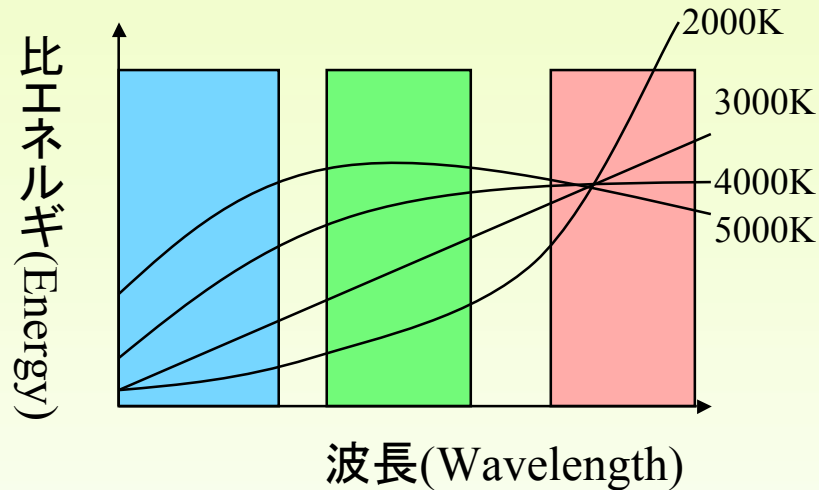


太陽光の放射エネルギー

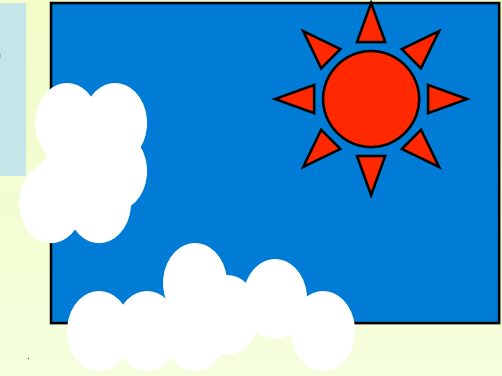


# 色温度とは(What is color temperature)?

ある物体が高温で光を出しているとき、その光と同じ色の熱放射をする黒体の温度

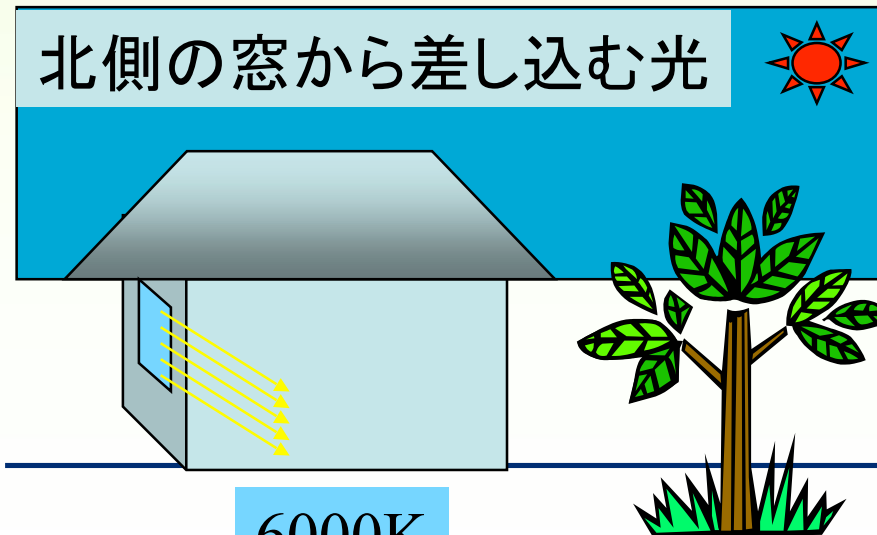


晴天時の  
直射光



4000K

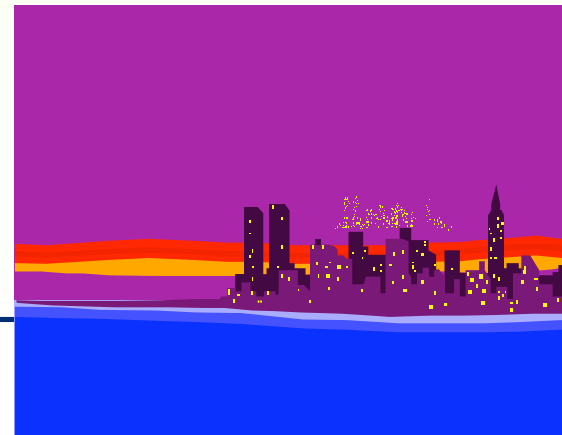
北側の窓から差し込む光



6000K

夕焼け

2000K



都大学  
TOYO UNIVERSITY

# 一日の色温度の変化



7.1 分光測光と測色学

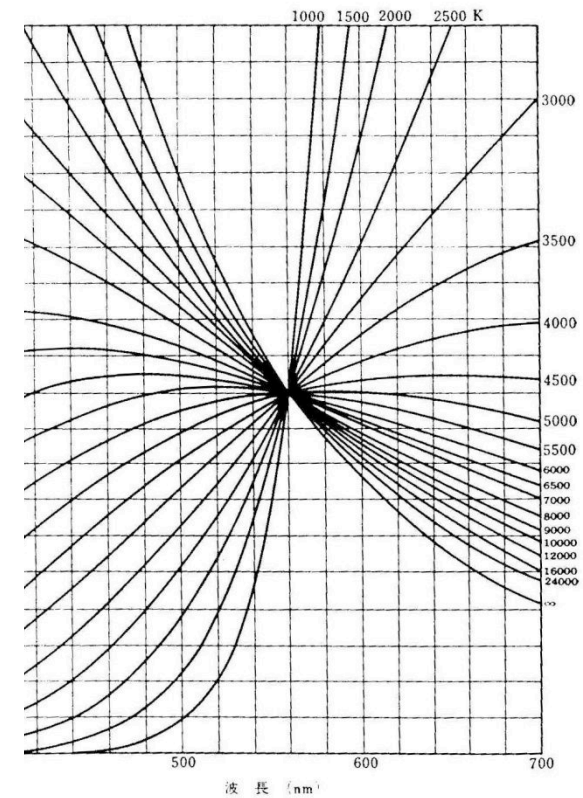
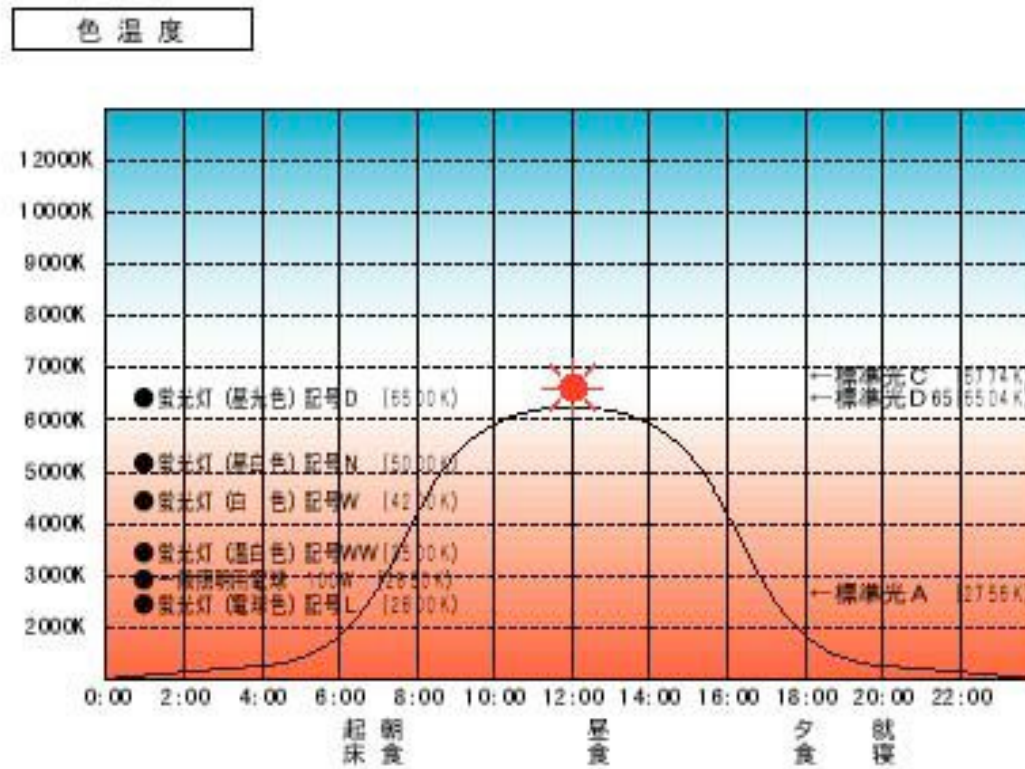
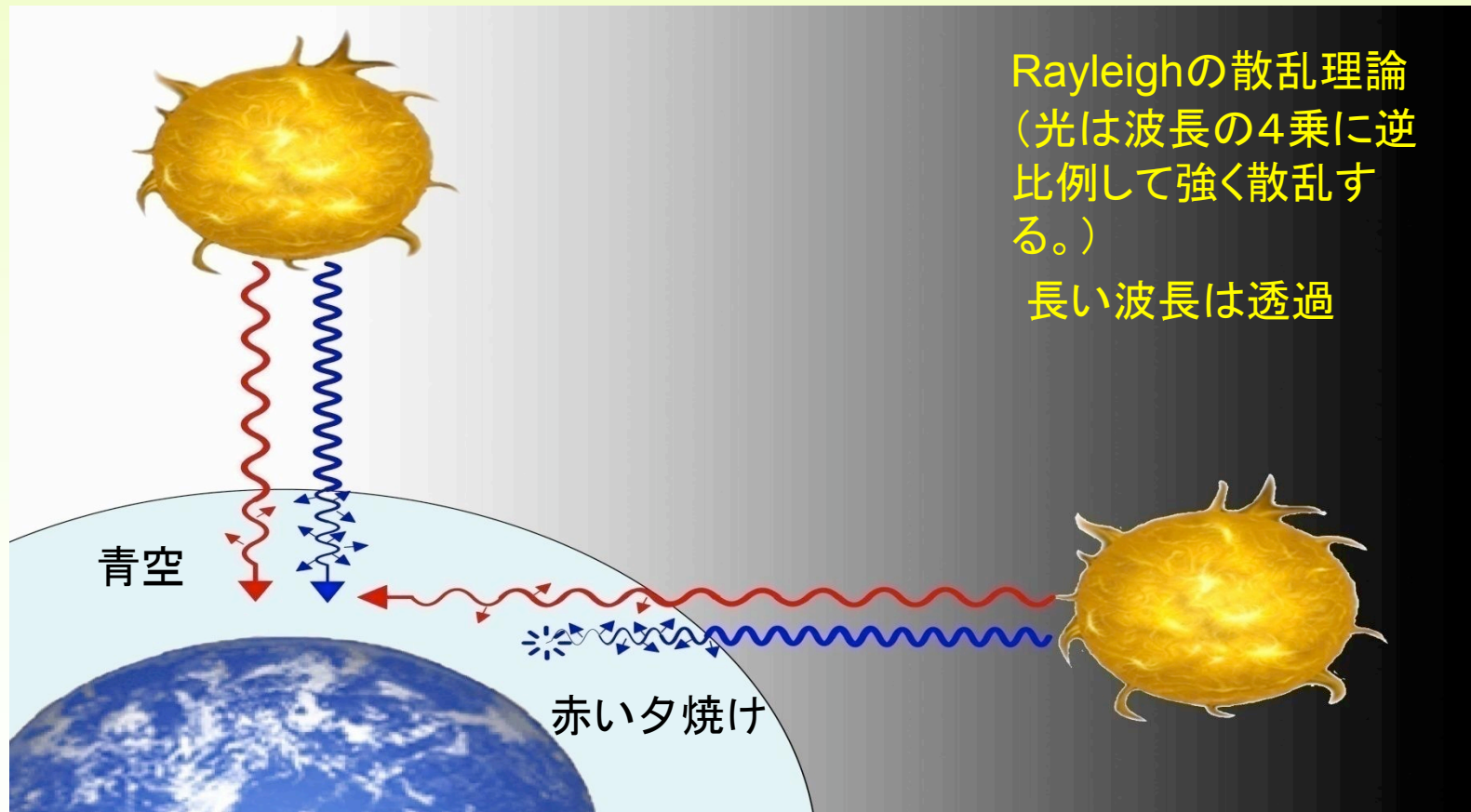


図 7.1 完全放射体の分光分布

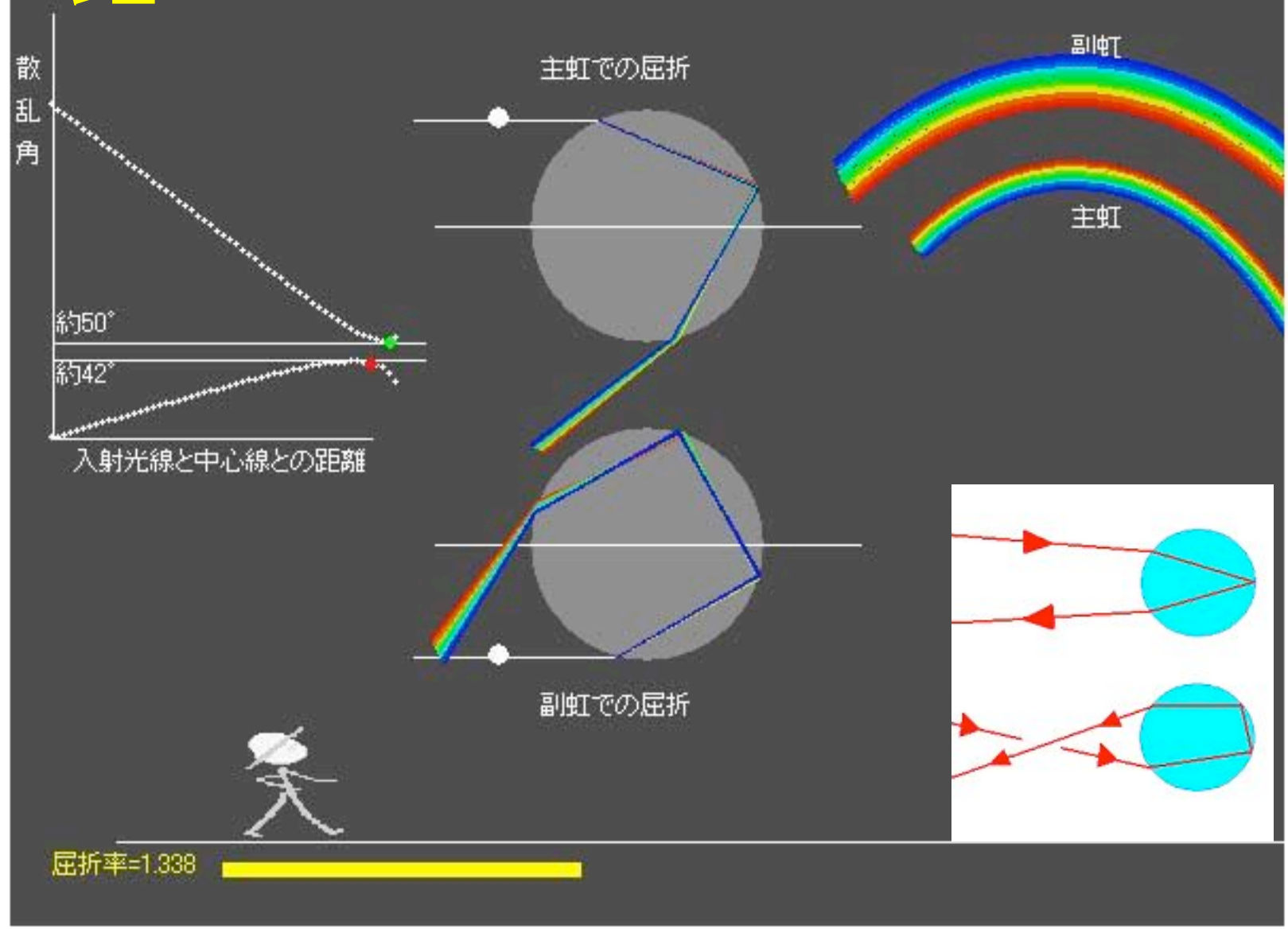
# 夕焼けが赤く見える理由

$$I(\theta) = \frac{I_0 \pi^4 d^6}{8R^2 \lambda^4} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta)$$



# 虹

太陽光線にたいして、主虹では約42°、副虹では約50°の角をなす



# 虹の見える方向

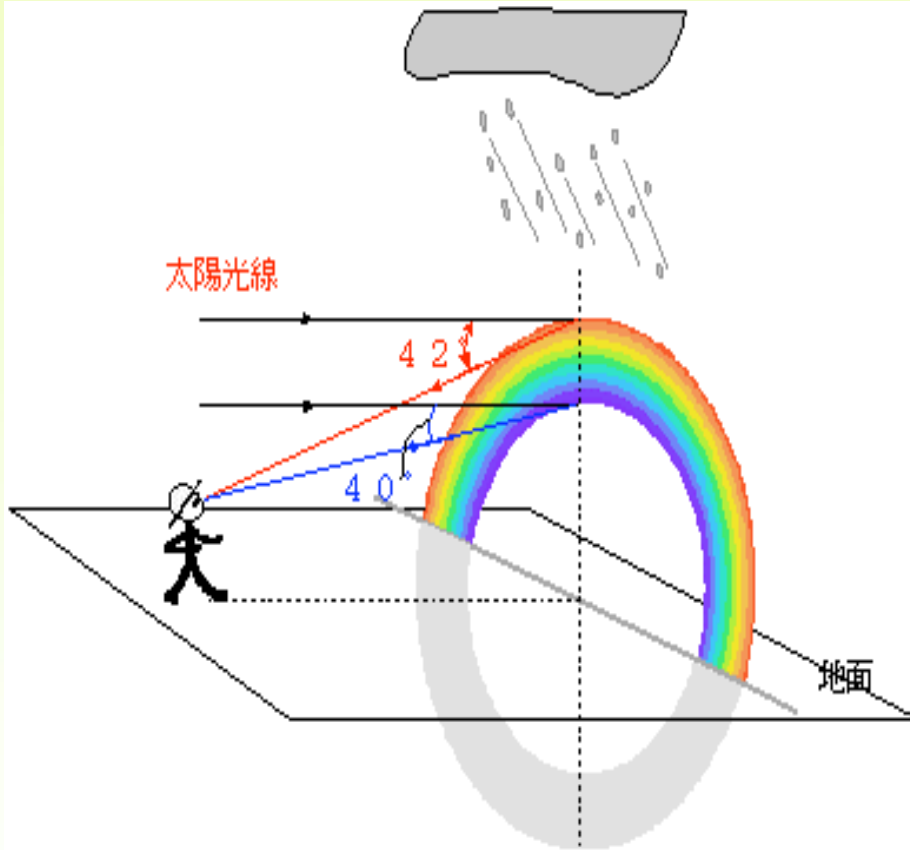


図4a  
(太陽光が水平入射→虹は最も高く見える)

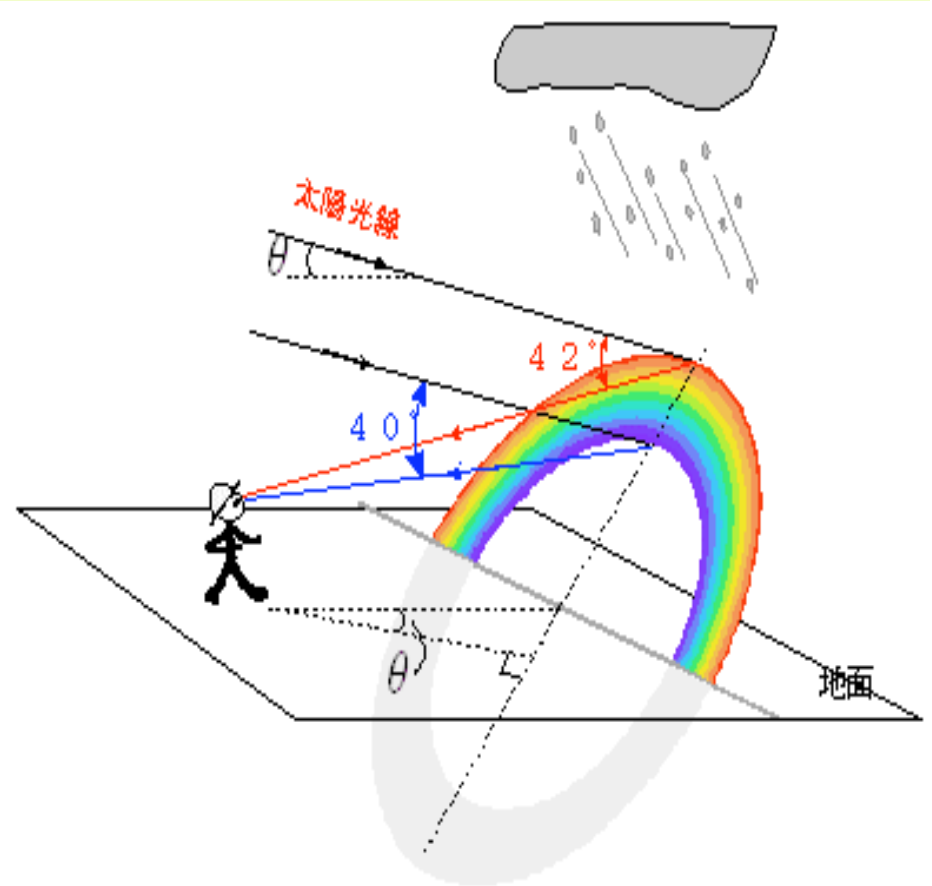
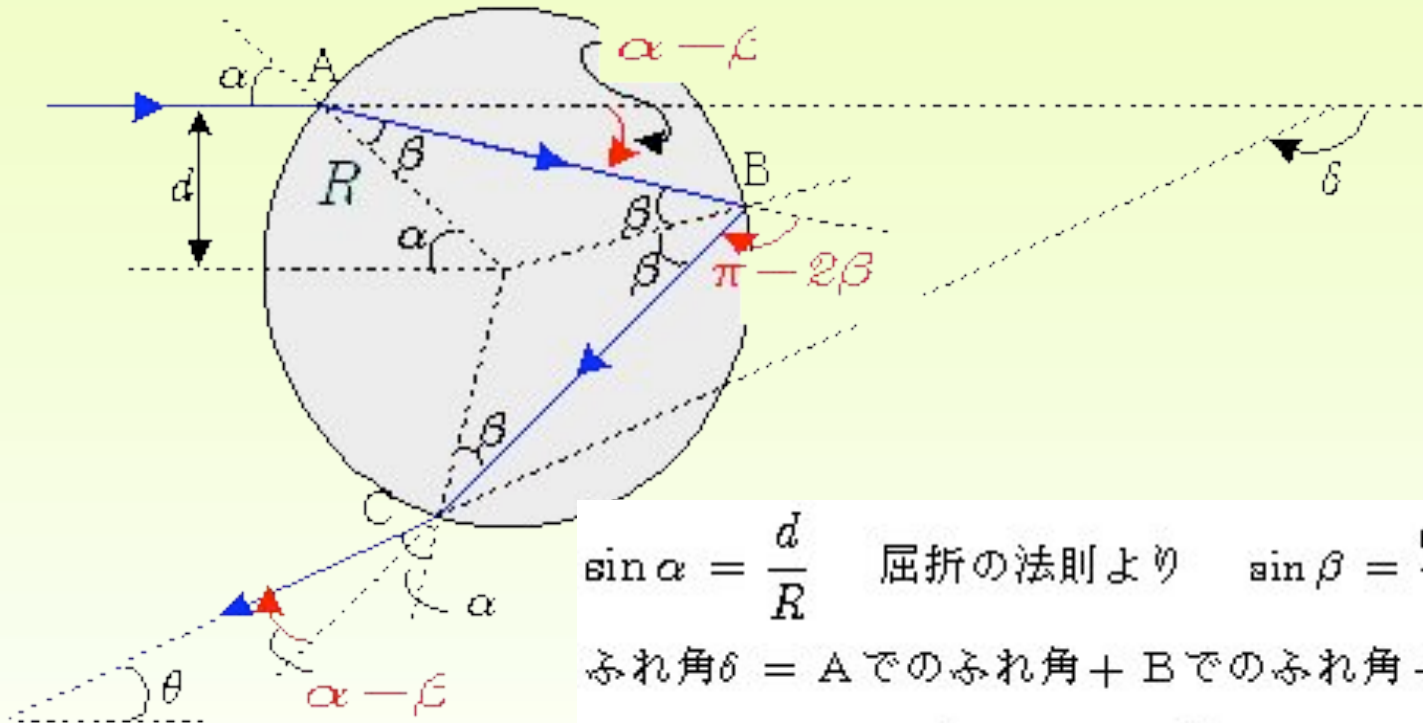


図4b  
(太陽光が斜め入射→虹の高度は低くなる)

# 主虹の屈折・反射(上半球への光の入射)



$$\sin \alpha = \frac{d}{R} \quad \text{屈折の法則より} \quad \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{d}{nR}$$

ふれ角  $\delta = \text{Aでのふれ角} + \text{Bでのふれ角} + \text{Cでのふれ角}$

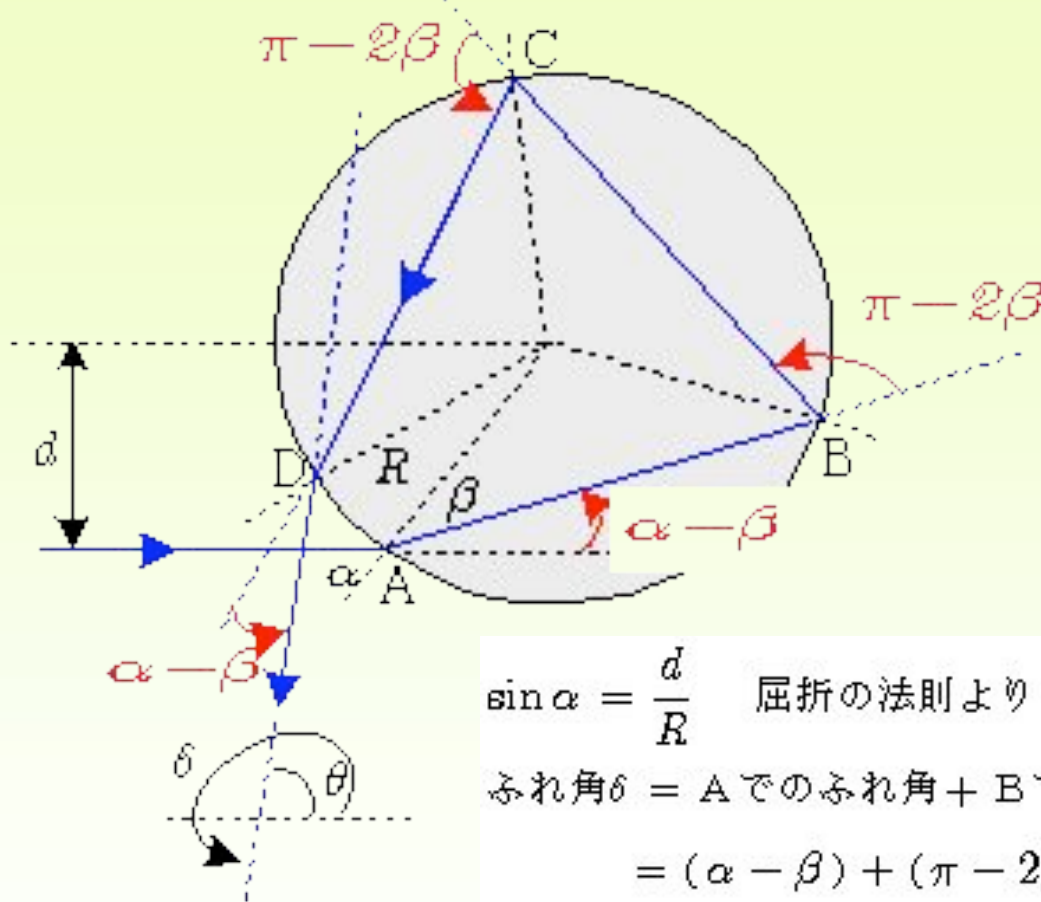
$$= (\alpha - \beta) + (\pi - 2\beta) + (\alpha - \beta)$$

$$= \pi + 2\alpha - 4\beta$$

$$\therefore \text{散乱角 } \theta = \pi - \delta = \underline{\underline{4\beta - 2\alpha}} \quad (\text{赤が42度, 紫が40度})$$

(波長が短いほど屈折率が大きいため)

# 副虹の屈折・反射(下半球への光の入射)

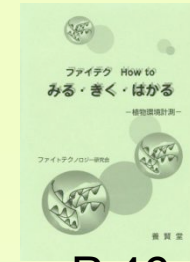


$$\sin \alpha = \frac{d}{R} \quad \text{屈折の法則より} \quad \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{d}{nR}$$

$$\begin{aligned} \text{ふれ角 } \delta &= \text{Aでのふれ角} + \text{Bでのふれ角} + \text{Cでのふれ角} + \text{Dでのふれ角} \\ &= (\alpha - \beta) + (\pi - 2\beta) + (\pi - 2\beta) + (\alpha - \beta) \\ &= 2\pi + 2\alpha - 6\beta \end{aligned}$$

$$\therefore \text{散乱角 } \theta = \delta - \pi = \underline{\underline{\pi + 2\alpha - 6\beta}}$$

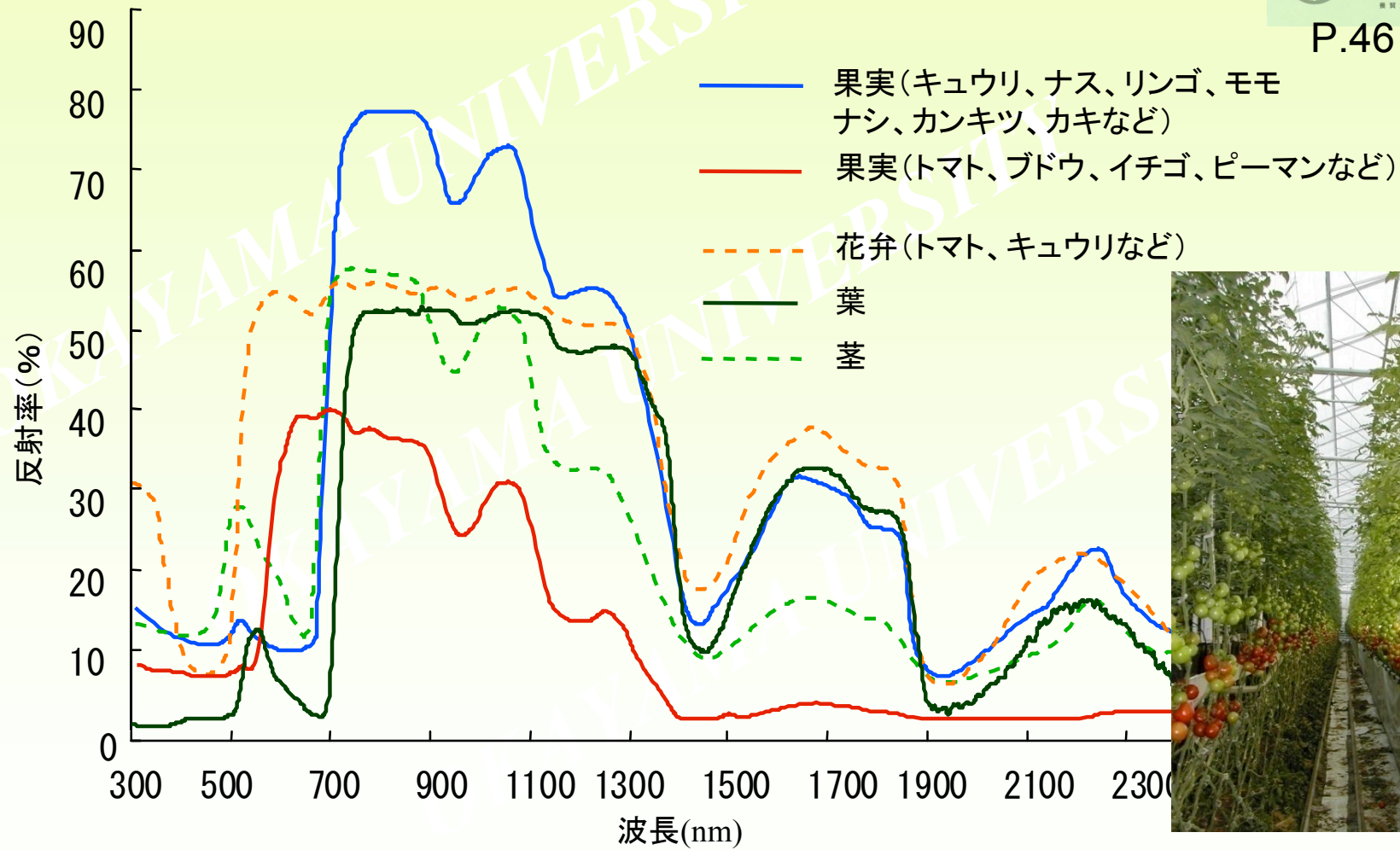
# 植物の色



P.46



P.15



植物各部位の分光反射特性



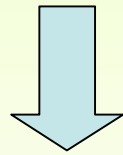
KYOTO

京都大学  
UNIVERSITY



どうして葉は緑色？

光合成を行うには、主として  
赤と青の光が必要



赤色(クロロフィル吸収帯: 670nm)と  
青色を吸収

それほど必要としない緑色は反射

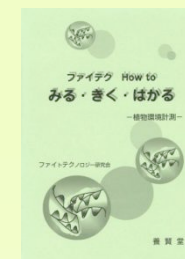
# 葉の色を測る・葉緑素を測る



色彩色差計

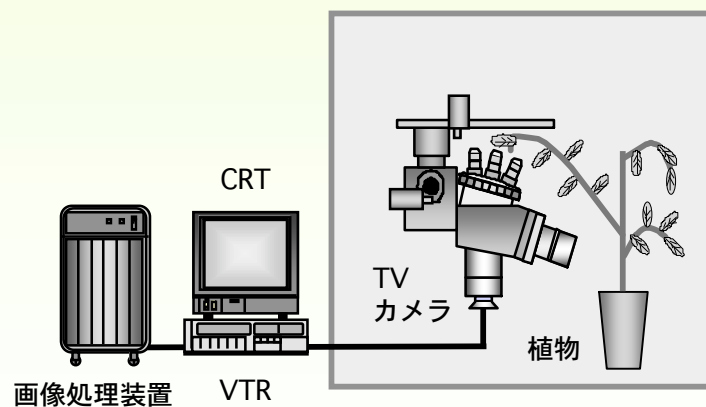


葉緑素計 (SPADメータ)



P.16, 20

P.138

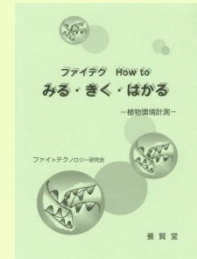


マシンビジョン (画像処理による計測)



# 葉の色を測る

植物の葉の色は植物の健康状態のバロメータである。病虫害に犯されたときはもちろん、通常の状態でも葉の緑色の濃淡で植物の栄養状態を知ることができる。ここでは、葉の色を測定するための二通りの方法を紹介する。



P.16

## STEP1 色彩色差計

工業製品の色彩を測定する機器として、光学機器メーカーから**色彩色差計**が市販されている。乾電池で駆動できる携帯型のものがあるので、植物にも適用が容易である。測定を行う際には測定器を対象物に密着させる必要がある。測定時には測定器内部のランプが発光し、対象物から反射した光を測定器内のセンサで計測する。測定した結果は様々な**表色系**で表示することができる。使用する場合には下記の点に注意する必要がある。

- 1) 測定範囲は通常円形で、直径8～50mm程度の測定器が市販されている。測定目的に合わせて測定器を選定する必要がある。
- 2) 測定器を葉に密着させるためには、葉を台の上に置く必要がある。植物の葉は薄いため透過する光もある。この透過光が台の表面で反射して再度葉を透過してセンサに届くこともある。したがって、測定する場合は台の条件を同じにしておく必要がある。

## STEP2 デジタル画像を利用する

ナビゲータ		情報		オプション	
R:	49	C:	61%		
G:	69	M:	37%		
B:	32	Y:	74%		
		K:	61%		
X:	142	W:			
Y:	82	H:			

図1 情報パレット



## STEP3 葉の範囲選択

画像全体から葉だけを取り出す方法は二通りの方法がある。一つは人間がディスプレイに表示された画像を目視で判断して選択する方法である。もう一つはコンピュータに自動選択させる方法である。ここでは自動選択ツールで選択後、 unnecessary部分を長形状選択ツールで削除した例を示す。

操作手順は次のとおりである。この画像は取込みの際に葉の両端を指で把持したので、指が unnecessary部分として写り込んでいる。

- 1) ツールボックスで [自動選択ツール] をクリックする。これにより隣接する画素の色が選択した色の範囲内のものであるかどうかで選択範囲が決まる。
- 2) 画像内で選択したい色の画素をクリックする。図2に示す範囲が自動的に

選択された。葉身の部分はほぼ正確に選択されているが、葉身以外の指の部分も選択されている。

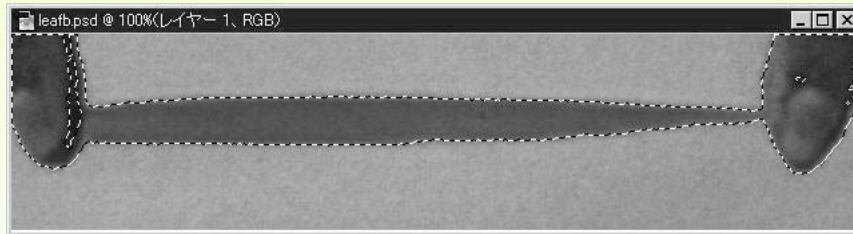


図2 自動選択

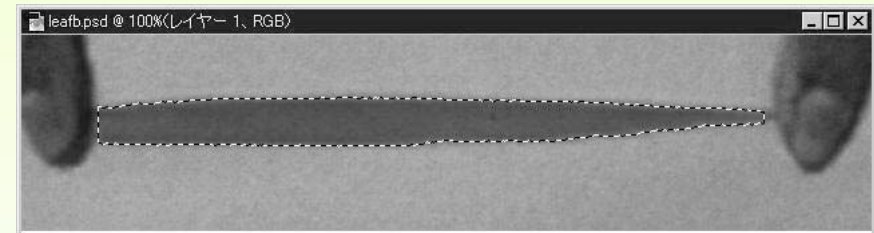


図3 葉身の選択

- 3) もし自動的に選択される範囲を変更したい場合は、自動選択ツールオプションパレットで、選択する色の範囲ボックスの値を変更する。なお、値は0から255までで、選択した画素の色に近いものだけを選択したければ小さい値を、範囲を広くしたい場合は大きい値を入力する。
- 4) 葉身以外の選択範囲を削除する。ツールボックスで「長形状選択ツール」をクリックする。[Alt] キーを押しながら削除したい範囲をドラッグする。図3のように選択範囲を変更できた。なお、選択範囲を追加したい場合は [Shift] キーを押しながら追加したい範囲をドラッグすればよい。



## STEP4 濃度値を求める

選択範囲の画素の濃度値分布をヒストグラムで表示させる。[イメージ]メニューの[ヒストグラム]を選択する。図4の「ヒストグラム」ダイアログの中の[チャンネル]の中からR, G, Bを選択すると、それぞれの濃度値ヒストグラムと平均濃度値、標準偏差などが表示される。



図4 ヒストグラム

## STEP5 濃度値の分布を図示する

[イメージ]メニューの[色調補正]の中の[ポスタリゼーション]を使用して、色の分布を大まかに図示することができる。図5に4段階で表示した例を示す。

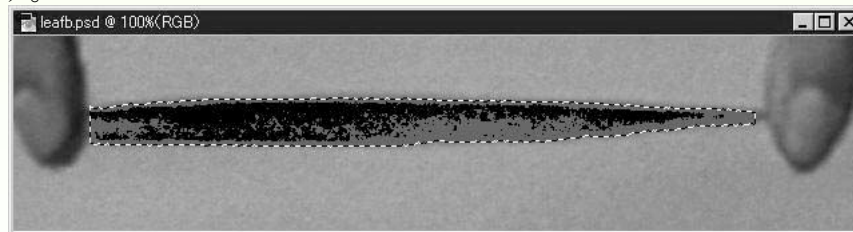


図5 濃淡値分布

# 葉緑素を測る

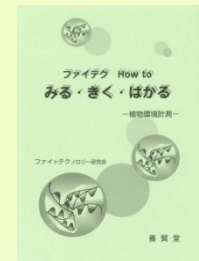
精密ほ場管理技術を用いて適切な窒素施肥をすることが、収量増加、環境保全やコスト削減の面から期待されている。一般に作物体の窒素含量が多くなると葉緑素も増加するという性質を利用して、葉身の葉緑素濃度を測定することで適切な肥培管理が行われる。

## STEP1 葉緑素濃度の非破壊計測

作物体の窒素含量が多くなると葉緑素含量が多くなり、葉の緑色が濃くなる。一般に葉緑素濃度の測定は、葉に対する透過光を用いるタイプと反射光を用いるタイプに分類できる。透過光を用いて測定するタイプは葉緑素の吸収ピーク波長673nmである赤色域を利用する。一方、後者はリモートセンシングと呼ばれる手法で、マシンビジョンを使用してスペクトルイメージを取得して計測する方式である。一般に反射光を使用する場合、緑色域の550nmの反射率が葉緑素推定に有効な波長とされているが、センサとしてはいまだ実用化されていない。これは、反射率測定的光源である太陽光がセンサの安定光にならないからである。

## STEP2 デジタル式葉緑素計

実用化されている葉緑素計として、透過光を使用するデジタル式葉緑素計（SPADメータ）がある。屋外で使用する上で問題となる光環境変化を除去するために、測定部に閉鎖空間を作って人工光を照射して測定することが特徴である。SPADメータは測定器内部に発光部と受光部があり、発光部にはピーク波長650nm付近の赤色領域のLED（発光ダイオード）とピーク波長940nm付近の赤外領域LEDの2光源が内蔵されている。測定する試料を発光部と受光部で挟むと、2つのLEDが交互に点灯し、



P. 20

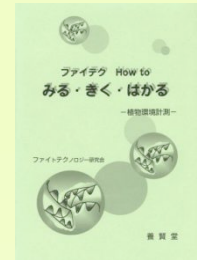


図1 SPADメータ  
(ミノルタ(株), SPAD502)



KYOTO 京都大学  
UNIVERSITY

その光が試料を透過して受光素子に導かれて光電変換される。葉緑素は一般に400～500nmの青色域と600～700nmの赤色域に吸光帯を有しているが、青色域ではカロチノイド類など他の色素の吸収波長と重複するため、葉緑素のみが吸収する赤色域と、どの色素にもほとんど吸収されない赤外領域の光学濃度差をもとにSPAD値を求める。このSPAD値は葉身葉緑素濃度と線形の関係にあることが確認されているので、SPAD値は葉緑素濃度を表す指標となる。しかし、SPADメータは葉を一枚ずつ測定するために多くの測定時間を要する。したがって、ほ場の一部のデータを代表値として利用することで**肥培管理**を行なっている。



P. 21

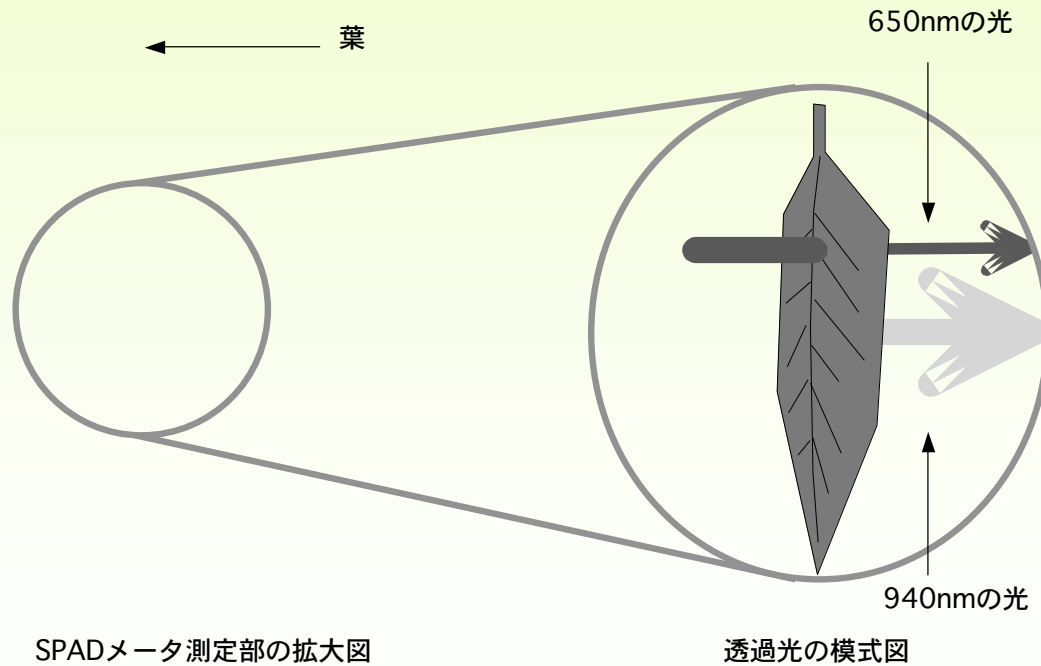


図2 SPADメータの測定部



## STEP3 SPAD値の算出方法

SPADは農水省の土壤作物診断機器実用化事業 (Soil and Plant Analyzer Development) においてミノルタ (株) が開発した計測器である。SPADメータ以外のデジタル葉緑素計も波長領域に若干の違いはあるが、前述した赤色と**近赤外**の2波長吸光度差測定法 (dual wavelength difference photometry) を用いている。SPAD値の算出方法は以下の通りである。

$$SPAD = k \log_{10} \left( \frac{IR_t / IR_0}{R_t / R_0} \right)$$

ここで、

SPAD : SPAD値

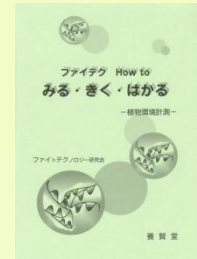
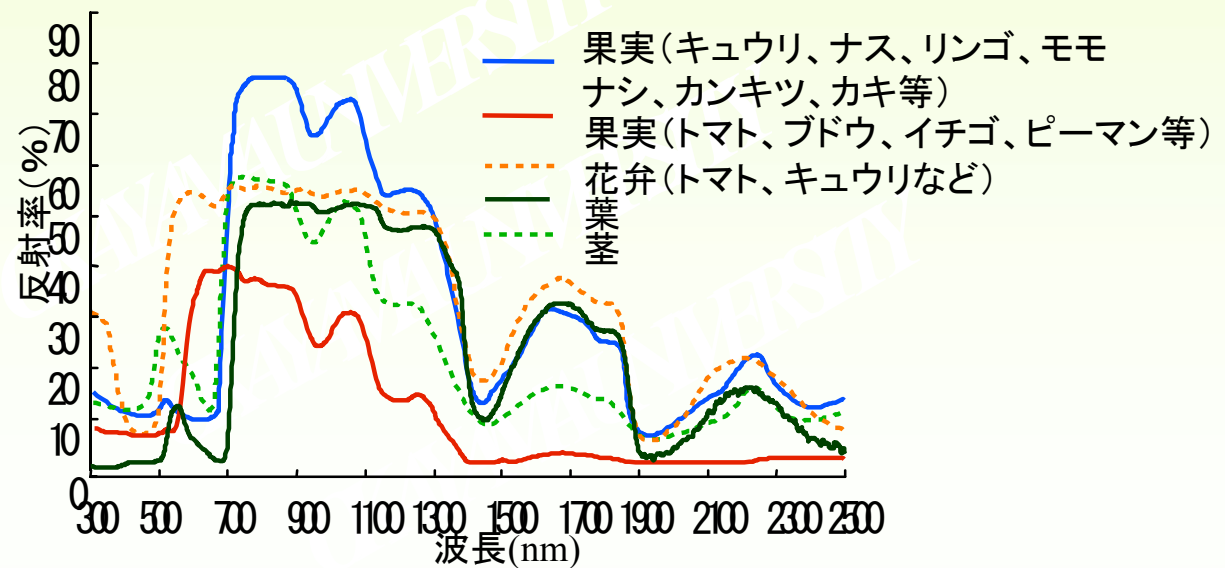
k : 定数

$IR_t$  : 赤外領域 (940nm) の透過エネルギー

$IR_0$  : 赤外領域 (940nm) の照射エネルギー

$R_t$  : 赤領域 (650nm) の透過エネルギー

$R_0$  : 赤領域 (650nm) の照射エネルギーである。



P. 21



KYOTO 京都大学  
UNIVERSITY