

# 人間の視覚系と色温度

澤見英男

## はじめに

私たちの目は、直径が約5センチメートル、左右6cm強離れている。外界は角膜、瞳孔、レンズを経由し、網膜上の画像として投影される。

網膜上には、ほぼ六角形の格子状に、平方ミリ当たり数万個から十数万個の密度で計6～7百万個の円錐細胞が分布している。網膜にある円錐細胞(cone)で得られた画像情報は円錐細胞の分布しない盲点から取り出される。一方、黄点には棒細胞(rod)が集中している。

円錐細胞には3種類あり、異なる波長の可視光線に反応し吸収する色素を含んでいて、吸収のピークはそれぞれ0.43 $\mu$ m(紫)、0.53 $\mu$ m(青緑)および0.56 $\mu$ m(黄緑)である。レンズにより結像した網膜上の画像は、色素に吸収された可視光線の強度の割合に応じた色画像として捕捉され、脳による外界認識の情報として利用される( $\mu$ m; micro-meter)。

網膜上の円錐細胞は、画像情報を処理・整理して脳に送り出すため、神経節細胞(ganglion)と数個単位で繋がっている。色および濃淡情報は各細胞で受けた光子の波長および個数により決定する。円錐細胞中の色素は光子を吸収し電子を放出する。この光量子効果による電気パルスが神経細胞に伝わり、光の色と強度を表す信号として処理される。光子1個で電子をどれだけ放出するかは量子効率と呼ばれ、眼球中の色素で数パーセントになっている(CCDなど半導体素子の量子効率は波長により90パーセントを軽く超える)。一方、網膜上のレンズ正面中央(黄斑)には棒細胞が密集している。この棒細胞の総数は、全体で1億個以上になる。棒細胞はかなりの個数がひとまとめになっていることから、解像度こそ低いものの高感度であり、星明りの下などでの暗視機能を有している。

視床下部に位置するニューロンから出た百数十万本の神経索と、網膜上の円錐細胞および棒細胞の側にある神経節細胞は、シナプス経路で繋がっている。神経節細胞は、複数個の円錐細胞や棒細胞からの信号を受け取り、簡単な処理をした画像情報として大脳に送り届ける。これは、センサからの画像データをせいぜい数十本の信号線によりそのまま送るデジタルカメラなどとは対照的である。網膜が頭脳中のニューロン約百億個中の百数十万個とほぼ直結していることから、目は脳の一部であると言われることがある。ところで、左右眼球それぞれの、右半球側の網膜からの信号は頭脳右半球に、左半球側の網膜からの信号は頭脳左半球側へと交差して繋がり、損傷に対処できるようになっている。

人間の視覚システムの応答時間は最短で20分の1秒程度と言われている。このため映

画では、静止画を順次表示し動画として見せるため、秒当たり24枚撮影した静止画を用いていた。しかし24枚では動きが固いことから、1枚当たり2回明滅させて投影している。これにより、視覚システム側は秒当たり48枚表示されているかの様に錯覚することから、滑らかな動きをしている＝動画として認識されることになる。

画像の明暗を区別する能力は、音に対するのと同様、対数的であることが知られている。

そしてその値域は、エネルギー比で百億段階にもなるが、目視している画像中の小領域内での明暗に限ると、一般的には2百段階程しか区別することができないといわれている。すなわち、画像の或る部分での明暗の変化がその部分の2百分の1以下である場合には、この変化の認識は困難になる。そのため平均的な明度の画像であれば、三原色の輝度値それぞれを8ビット256階調で量子化しても、それほど不自然には見えないことになる。

一方、三原色の輝度値を8ビットよりも多いビット数で量子化して、エネルギー値をより細かく区別できるようにすれば、より情報量の多い画像を得ることができる。実際、最新のカメラ、医療や資源探査分野で用いる画像は人間の視覚系に合わせた誤魔化しをせずに、輝度値を14ビットとか16ビットで量子化した画素データを用いている。

また、身近な機器、イメージスキャナなどにおいても、センサ直後のアナログ信号を12ビット以上で量子化、デジタル化し、これを適切に処理して標準的な8ビット画像として出力するようにしてあることが多い。

画像の表示装置には、左右の視差と眼球運動および対象物ごとの焦点差と運動の差を利用した立体視感、また眼球以上の高解像度表示による臨場感の実現を目指したものなど、人間の視覚特性に十分な配慮をしたものが増えている。

## 色温度と三原色

産業革命以降、均質な鉄を大量生産することが求められていた。そこでベッセマーは鉄を加熱した際の色と温度との関係を明らかにし製鉄業界の要望に応えた（19世紀）。さらにプランクはこの熱輻射に関する公式を原子の構造から導出した（20世紀）。

$$I = \frac{8 \pi h c}{\lambda^5 \left( e^{\left( \frac{h c}{k T \lambda} \right)} - 1 \right)}$$

$h=6.6260700E-34$ (Js ; ジュール秒)	プランク定数
$k=1.380648E-23$ (J/K ; ジュール/ケルビン)	ボルツマン定数
$c=2.99792458E+08$ (m/s ; メートル/秒)	光速

これによりスペクトル強度  $I$  と絶対温度  $t$  (単位はケルビン: Kelvin; K) との関係は、強度の最大値を 1 に正規化して計算すると、以下に示したようなものになる。

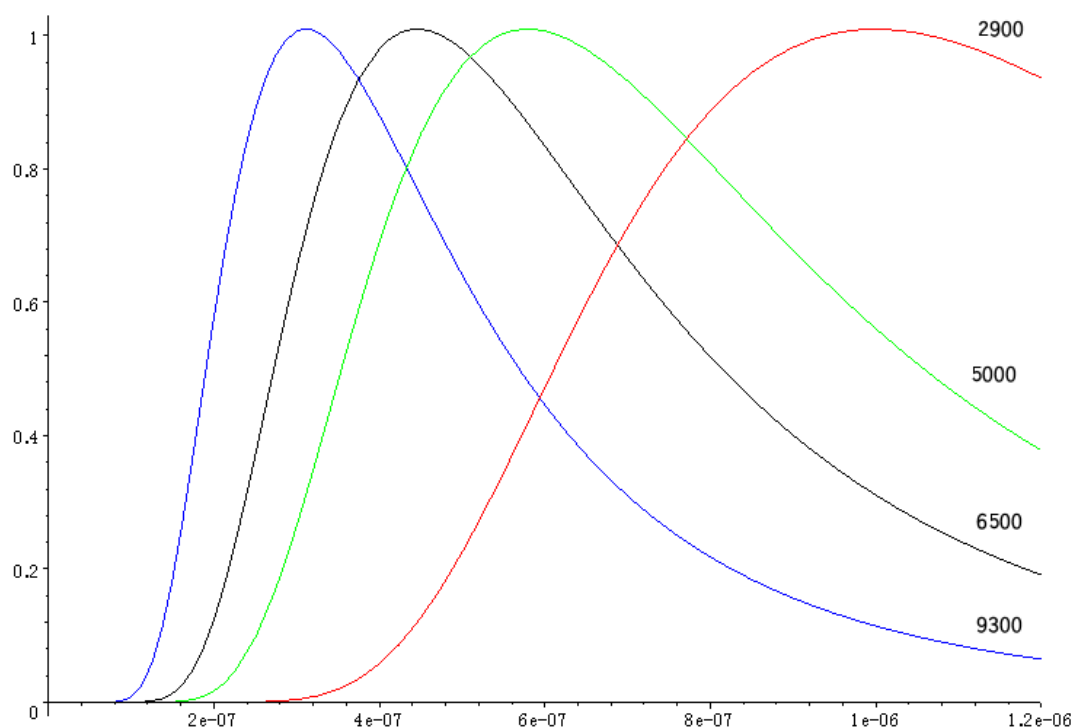


図 1 黒体輻射のスペクトルと色温度 ( $t = 2900, 5000, 6500, 9300$  K)

横軸は波長 ( $\lambda$ ) で単位はメートル(m) 縦軸はスペクトルの強度, 数値は絶対温度(K)

可視光線の波長 ( $\lambda$ ) は約  $400 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$  (nano meter =  $10^{-9} \text{ m}$ ) である。そして赤色 (R) は  $675$ , 緑色 (G) は  $525$ , 青色 (B) は  $475 \text{ nm}$  の波長に対応する。ある温度における黒体輻射をその温度での白色光とし, 逆に, 白色光のスペクトル分布から決まる黒体輻射の温度を色温度 (color temperature) と定義する。これより, ある色温度でのスペクトル分布から, 白色光を構成する RGB の相対強度比を知ることができる。日中自然光の色温度は  $6500 \text{ K}$  に相当する。これは真昼の太陽光は黒体輻射に換算して絶対温度  $6500$  度の照明光に相当することを意味している。また日が少し傾いてくる昼下がりに, 太陽光の色温度は大気層を長い距離通過するため  $5000 \text{ K}$  に低下する。一方, 室内照明用・白熱電球の色温度は  $2900 \text{ K}$  前後になり, そのスペクトルは長波長方向すなわち赤色方向にシフトしているが, それでも微量の紫外線を含んでいる。

私たちの眼球は, 片目当たり  $6$  百万  $\sim 7$  百万画素の解像度を有し, 百万本以上の神経索を経て画像情報を左右の頭脳へと伝える, 外界認識のための窓口の働きをしている。ここでは照明光の色温度を, 測定値ではなく目で感じることでできるスペクトル強度分布により規定することを考えてみる。波長 ( $\lambda$ ) が  $400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$  の可視光線全てに対応する色が全て含まれているという意味で, ある温度における輻射光を白色と考え, これを基準値 1 にしてスペクトル強度を求めることができる。波長  $525 \text{ nm}$ , 色温度

6500Kを基準にした場合、色温度とスペクトル強度との関係は、例えば表計算ソフトを使うことにより手軽に計算することが出来、次のようになる。

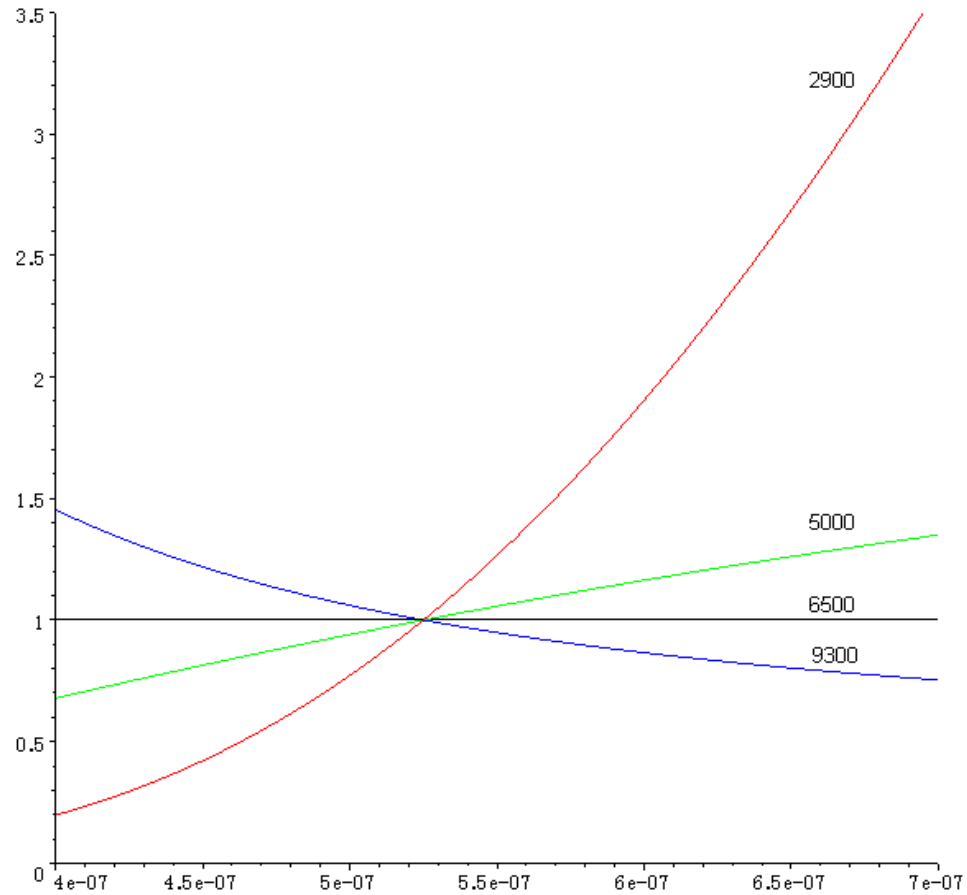


図2 黒体輻射の相対的スペクトルと色温度（基準色温度6500K）

横軸は波長(λ)で単位はメートル(m)，縦軸はスペクトルの相対的強度，数値は絶対温度(K)

この結果から、輻射温度の下降に伴い赤くなり、上昇するにつれて青緑みがかってくる、照明光の色温度と三原色(RGB)との定量的な関係を計算することが出来る。ただしこの色温度であっても、その温度における白色光であり、その割合こそ変化するものの三原色全てを含んでいることを注意しておく。

色温度5000Kのスペクトルを白色の基準にし、波長525nmの純緑色の輝度を値1に正規化して計算すると、色温度とスペクトル強度との関係は次のようになる。

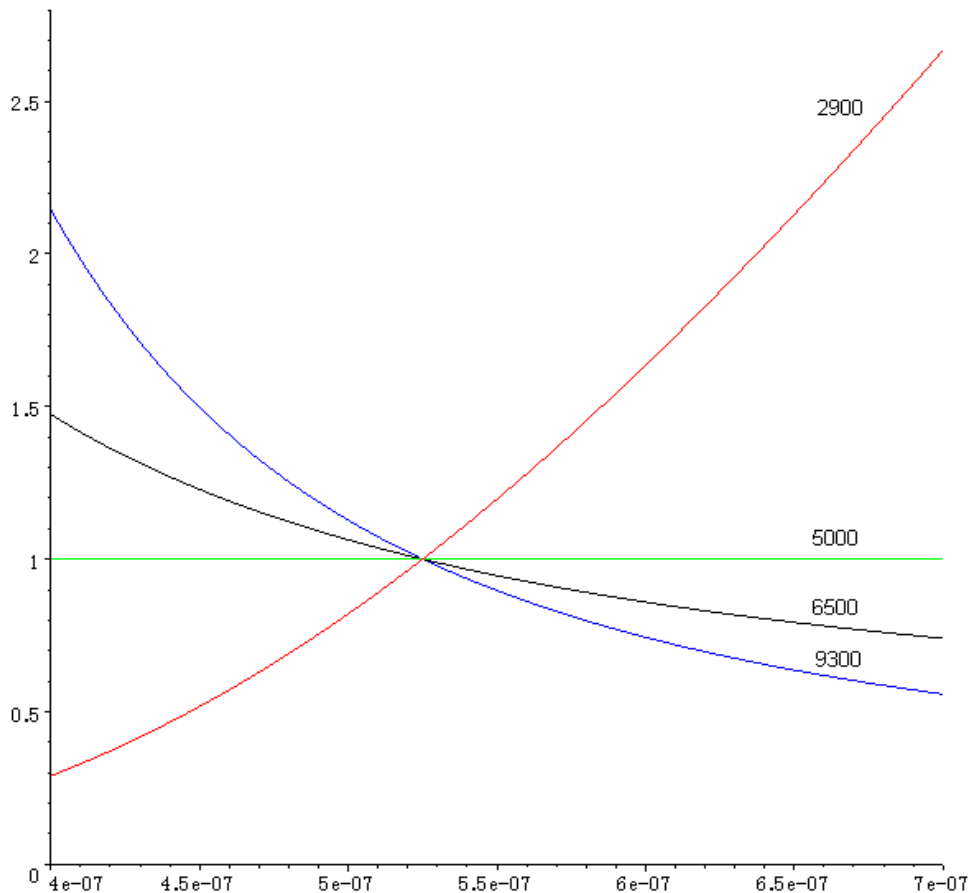


図3 黒体輻射の相対的スペクトルと色温度（基準色温度5000K）

横軸は波長( $\lambda$ )で単位はメートル(m), 縦軸はスペクトルの相対的強度, 数値は絶対温度(K)

この計算結果に基づき, RGBの輝度値すなわち強度を調整して色温度を変更することにより, 例えば屋下がりのような雰囲気画像から真昼とか夕方のような画像を得ることができる。しかし, 地域差とか季節による色合いの違いは, 単純に, 色温度だけで扱えないことを注意しておく。ところで, 植物の葉に含まれている葉緑素は波長700nmと680nmの赤色光に相当する光子を捕虫網のようにして数個ずつ捉え, これをエネルギー源として光合成を行っていることが知られている。このため私たちが良く目にする葉の色は, 白色から赤を除いた色すなわち赤の補色でもある緑色になる。

国際照明委員会の表色系「CIE1931」に基づいて, 色温度とRGB値との関係を, 範囲2800K~10000Kについて改めて調べることにする。これは, 緑色(G:波長546nm)のスペクトル強度を1にした場合, 赤(R:波長700nm)および青(B:波長436nm)のスペクトルの相対的強度が色温度によりどう変化するかを, 6500Kおよび5000Kを基準にして求めることにも対応する。真昼の太陽光線の色温度は6500Kである。この色温度6500Kで撮影した画像を, 例えば5000Kで撮影したかのようにするには, 緑色の輝度はそのままにしておき, 青色の輝度を26%下げ, 赤色に関しては29%弱上げれば良いことが分かる。このようなことを手許の画像によ

り試すことで、色温度と三原色に関する定量的な理解が深まるものと思う。

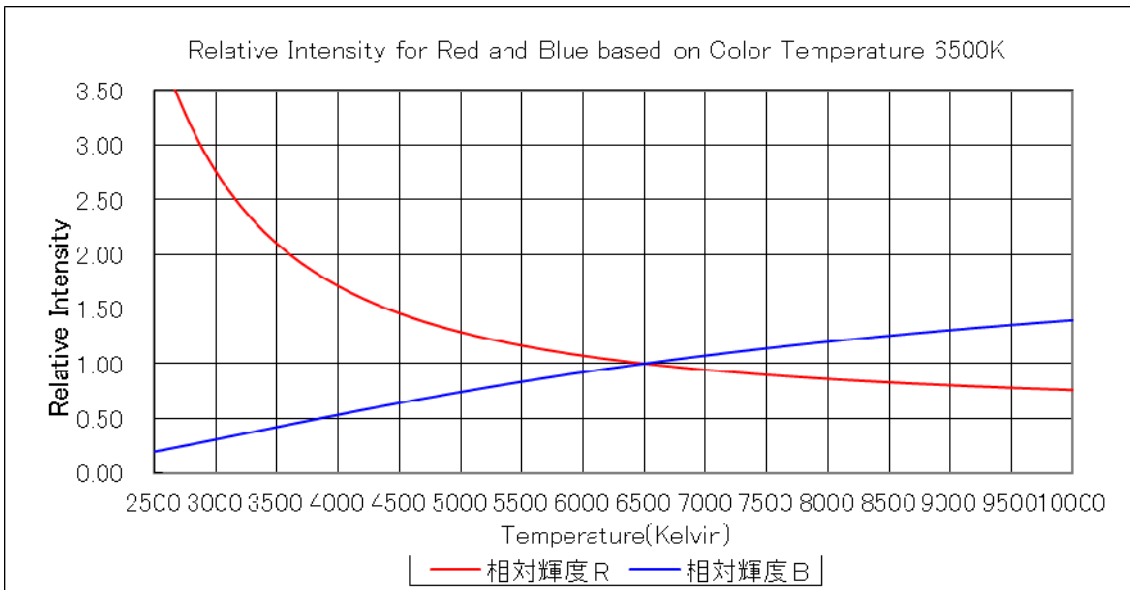


図4 色温度と三原色との関係 (CIE色温度6500K)  
横軸は絶対温度(K) 縦軸はRGB各成分の相対的強度

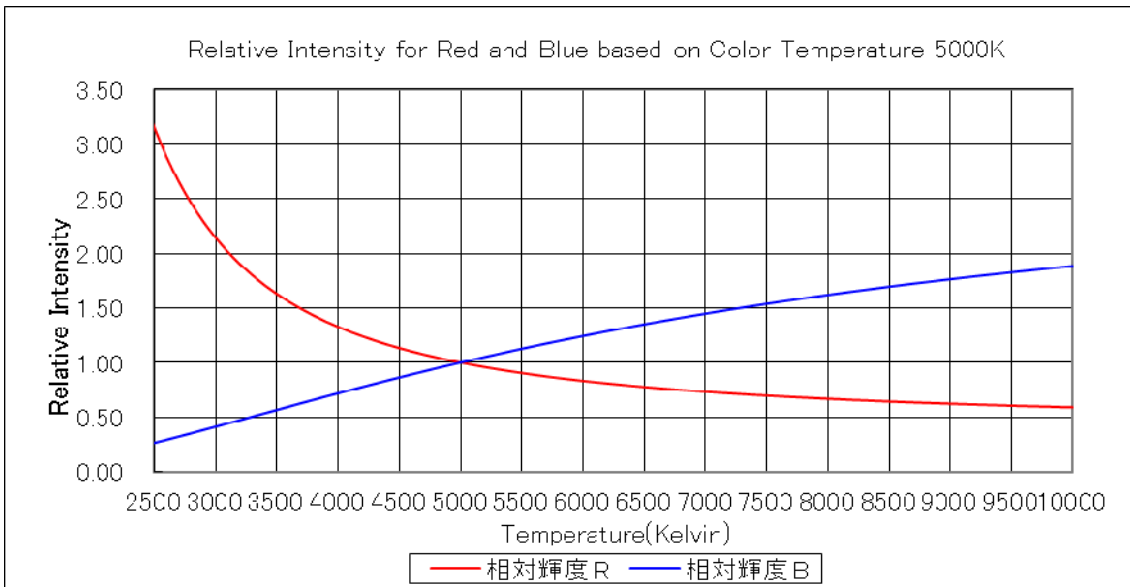


図5 色温度と三原色との関係 (CIE色温度5000K)  
横軸は絶対温度 (K) 縦軸はRGB各成分の相対的強度

色温度と三原色との定量的な関係から、黒体輻射を基準にした特定の比率でRGB値を組み合わせることにより、ある色温度における白色光を一意的に定義することができる。さらに、ある色温度を基準にして、別の色温度における白色光をRGB値の比率により求めることもできる。以下に、幾つかの代表的な色温度を基準にした場合につき、簡単な計算に基づいて、範囲2800K~10000Kの各色温度に対応する白色光がどの

ように感じられるのかを定性的に示しておく（黄色の白色光は存在しないことに注意）。

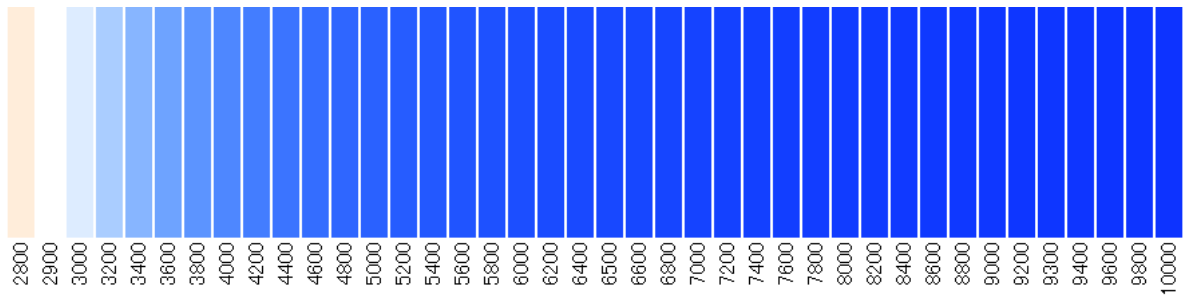


図6 a 各色温度に対応する白色光（基準色温度2900K）  
横軸の数値は絶対温度(K) 色温度2800Kの白色光は薄桃色

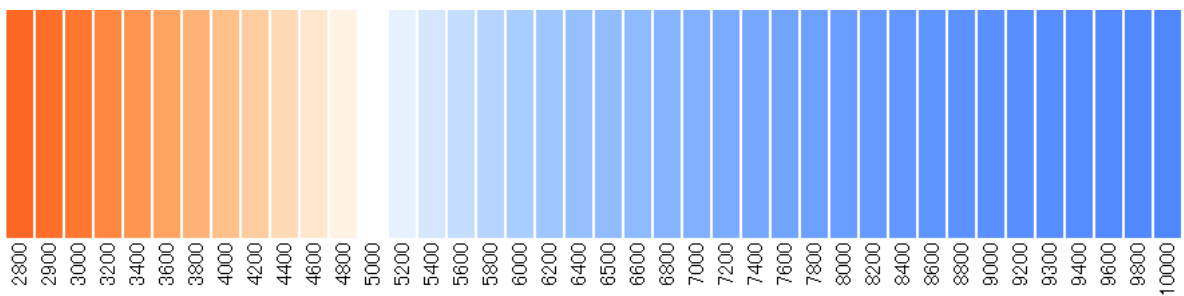


図6 b 各色温度に対応する白色光（基準色温度5000K）  
横軸の数値は絶対温度(K) 色温度5000Kの白色光のみ白色

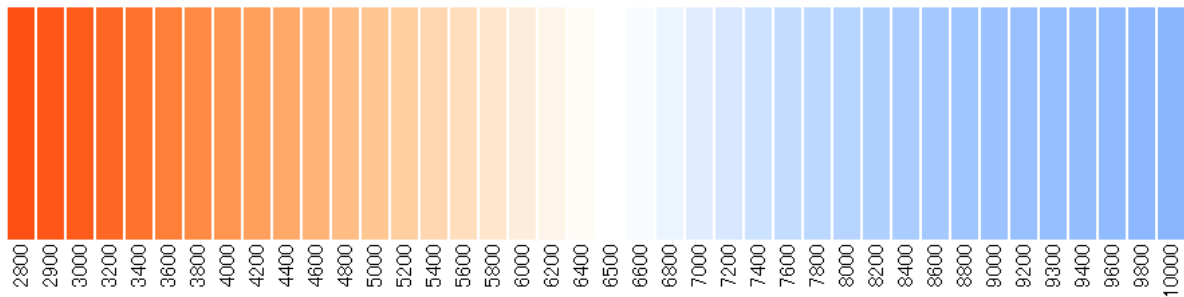


図6 c 各色温度に対応する白色光（基準色温度6500K）  
横軸の数値は絶対温度(K) 色温度6500Kの白色光のみ白色

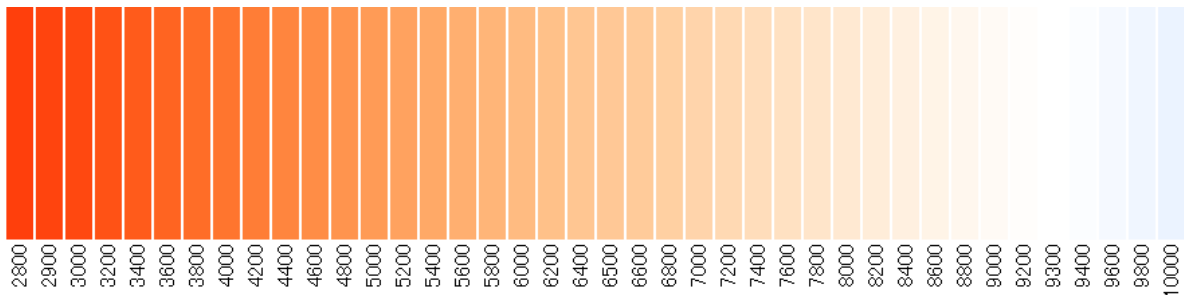


図6 d 各色温度に対応する白色光（基準色温度9300K）  
横軸の数値は絶対温度(K) 色温度9300Kの白色光のみ白色

基準の色温度を2900Kにすると(図6 a), 色温度2800Kの白色光は薄桃色に,

2900Kは白色に、そして白色光とは言うものの、2900Kよりも高くなると急速に青みの増してくることが分かる。色温度5000K(図6b)と6500K(図6c)を基準にすると、基準色温度を中心にして、低くなるに従い徐々に赤みの、高くなるにつれ徐々に青みの強調されてくることも分かる。基準色温度9300K(図6d)については、色温度の低下に伴いゆっくりと赤みの増してくることなどが分かる。

次に、写真を用い、色温度の差異を確認してみる。同じ風景ではあるが、色温度に応じたRGB値の変更により、一方は正午にもう一方は夕方に撮影したように見える。



写真1 a スカイテラス (色温度6500K)



写真1 b スカイテラス (色温度2900K)

一般に、映画で用いる白色の色温度は6500Kなのに対して、TVでは9300Kが標準となっている。これは中緯度以下の日本では、TVの置いてある空間の照明に色温度約1万Kの蛍光灯が用いられているため、TV画面の色温度を6500Kにすると赤



色に偏り、不自然に見えるためである。一方、私たちの目は無意識にこの色温度調整を行っているため、表示画面だけを見ている分には特に色温度の差を意識する必要は無い。CIE標準表色系では、特定波長の線スペクトル純色を三原色（純色）の加色混合により表すべく、純色側へ加色する場合を負値にして、三刺激値 (R, G, B) を求めている。

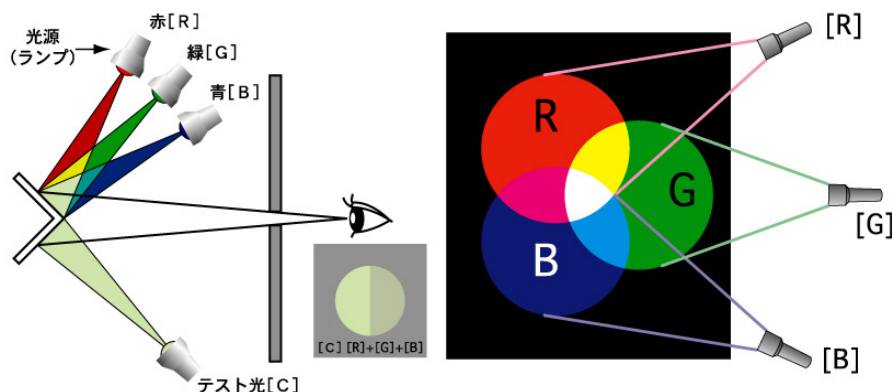


図7 a 特定波長の純色とCIE1931三刺激値  
視野角2度で分光器から半円状に投影された純色を加色混合により再現

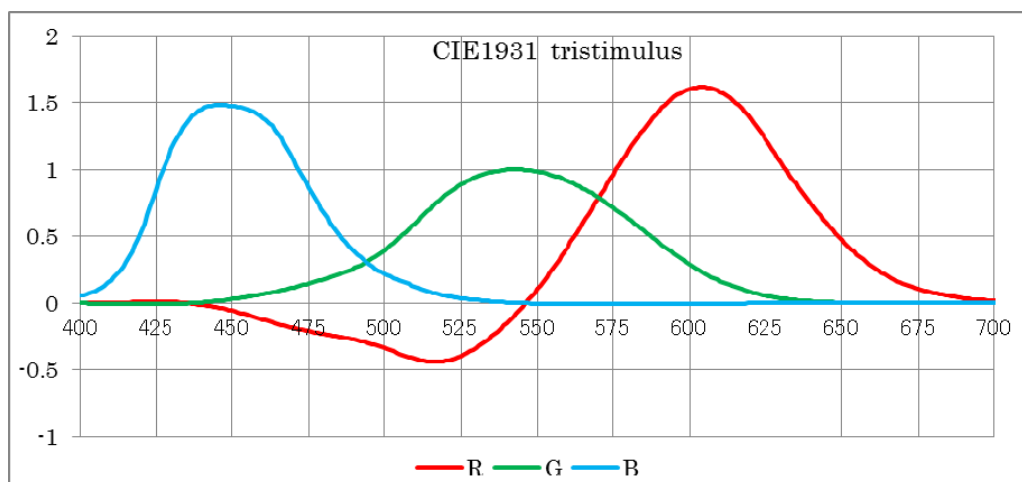


図7 b 特定波長の純色とCIE1931三刺激値  
横軸は純色の波長で単位はnm, 縦軸はRGBの相対強度

例えば、波長500nmの純色に0.33Rを加えた色（負値に対応）は0.40Gと0.22Bの加色混合に等しくなる（500nm：-0.3338R+0.3973G+0.2223B）。言い換えると、すべての色を三原色だけでは合成できない事が分かったのである。この明るさを表す値が負になることを避けるべく、以下の式により、RGBからXYZ表色系の座標（正值）に変換する。

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

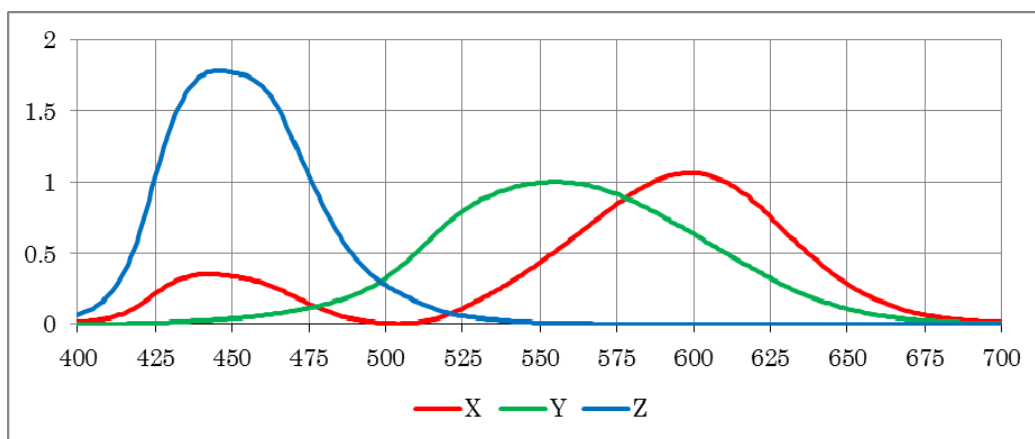


図8 特定波長の純色とX Y Z値  
横軸は純色の波長で単位はnm, 縦軸はX Y Zの相対強度

X Y Z座標値を正規化し, 明るさ一定の色空間「x y表色系」へと変換する(図9)。

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

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

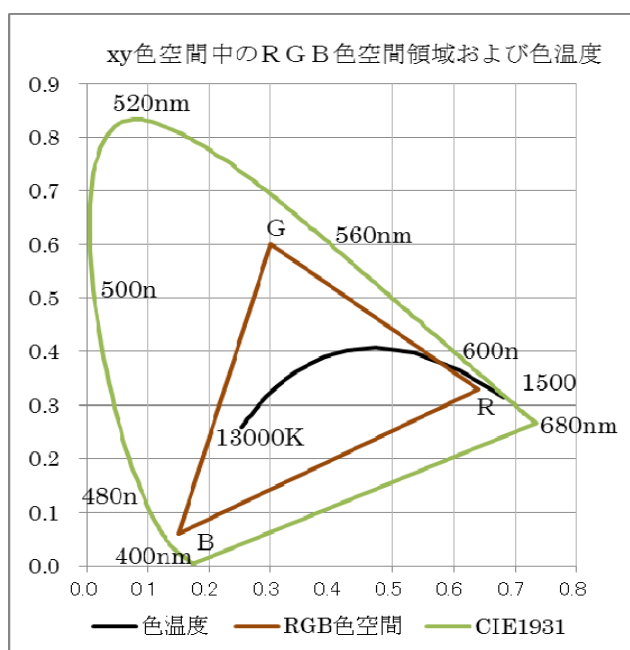


図9 C I E 1 9 3 1標準表色系のRGB色空間領域と色温度  
横軸はx, 縦軸はy, 高い色温度では青緑色, 数値は純色の波長と色温度

ここでは赤色(R)を波長700.0nm, 緑色(G)は546.1nm, 青色(B)を435.8nmに近似して, x y表色系における温度変化に伴うこのような色温度の軌跡を, RGB色空間領域と併せ, (C I E 1 9 3 1)色空間領域内に重ねて描いている。

標準表色系の色空間領域は, 三角形のRGB色空間領域よりも広く, これはレーザー光

線のような、赤よりも赤、緑より緑、青より青といった豊富な色の存在を示している。

## 色から感じる刺激は異なっている

ここでは、熱ではなく電圧と色とが関係する、発光ダイオード(LED)関連の解説をする。プランクによれば、光量子のエネルギーは次の式により与えられる。

$$E = h\nu, \quad \text{ただし } h \text{ はプランク定数, } \nu \text{ は波数}$$

波数  $\nu$  は光の速度 ( $2.99792458 \times 10^8$  メートル/秒) と波長との比を表している。

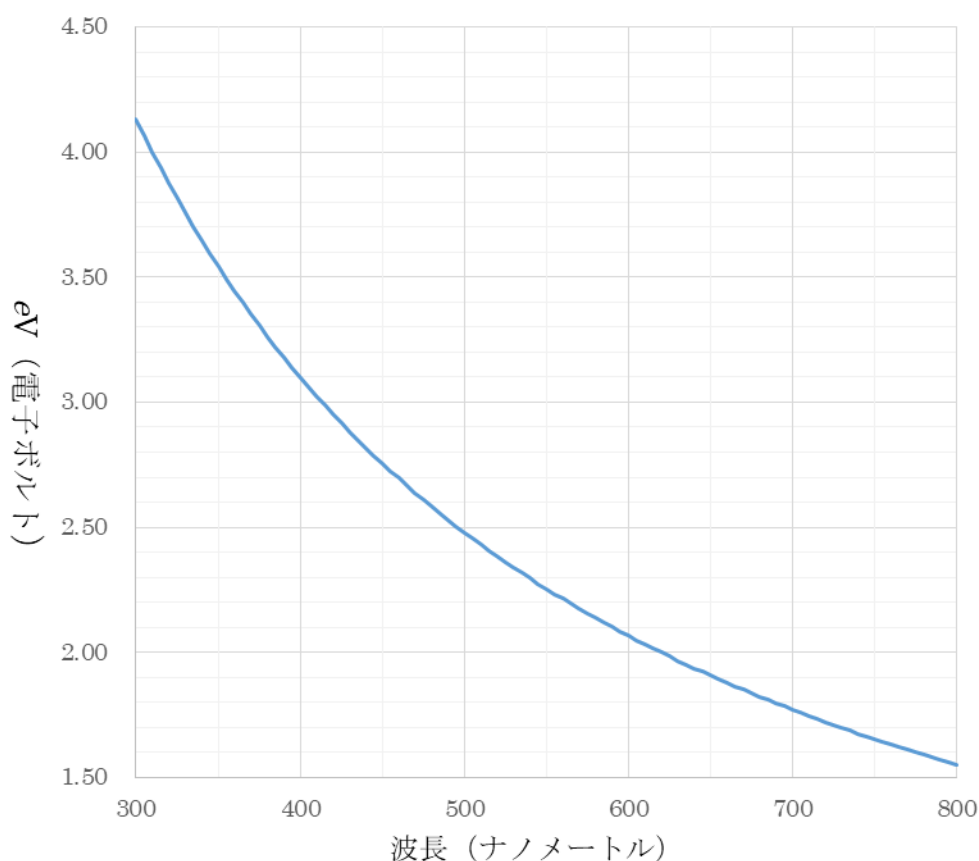


図 10 波長と電子ボルトとの関係

横軸は波長(300~800nm) 縦軸は電子ボルト(eV)

電子 1 個の電荷 ( $q = 1.60217733 \times 10^{-19}$  クーロン) は分かっているので、この電子 1 個を V ボルトで加速する際に必要とされるエネルギー ( $E = qV$ ) との比較から、原子内の軌道を電子が遷移する際に放射・吸収する可視光線の波長(300~800 ナノメートル)と軌道エネルギーの差、電子ボルト(eV)との関係を簡単な計算により求めることができる(図 10)。

これより、赤色発光ダイオード(例えば波長 675 nm)だと 1.8 ボルト以上を、青色発光ダイオード(例えば波長 475 nm)は約 2.6 ボルトの電圧を加えることによりはじめて光源として動作することが分かる。先に触れた植物による光合成は、波長が約 700 nm と 680 nm の赤色光の粒子(光子)を葉緑素により捕虫網のようにして計 8 粒捕らえ 1.4 eV 以上のエネルギーを蓄え、このエネルギーを使って水と二酸化炭素から炭水化物(CH<sub>2</sub>O)と酸素を得るといった奇跡のような過程から成り立っている。

これらのことは、エジソン以来の(何ボルトでも動作する)タングステンフィラメントの加熱による光源と比較し奇異に思えるかも知れない。しかし、量子力学によれば、何ら矛盾の無い物理現象である。すなわち簡単に言い切ってしまうと、一方は熱による原子核の振動に由来する電子の軌道の不規則な変化に、そしてもう一方は、半導体に電圧を加えることにより加速した電子の、規則的な軌道の遷移に由来していることになる。

ところで、いわゆる化石燃料を燃やすことにより発生する熱は、先に述べた光合成により有機物の形で蓄えられた化学結合エネルギーの開放と考えることもできる。このことは、原子 1 個あたりに換算して、化石燃料の燃焼により電子ボルトオーダーの熱が発生することを意味する。これに対し原子炉内の核反応では、核分裂だと原子 1 個あたり数億電子ボルト、核分裂に伴い派生する物質の核崩壊でも数百万電子ボルトという、圧倒的な量のエネルギーを開放している。このような桁違いのエネルギーでも、核分裂の確率を秒あたり数千万分の 1 程度になるよう制御し多数の周辺原子により均すことで、熱としての利用が可能となる。すなわち燃料としての石炭 3 千トン、核燃料 1 キログラム程と置き換えることができ、アインシュタインによると僅か 1 グラム相当のエネルギーにしか過ぎないのである。ただし軽くなるにつれ運搬の手間は大幅に省けるのかもしれないが、例えば、狭い場所で瞬時に 1 グラムのエネルギーを開放すると TNT 火薬 2 万トン相当以上という大変な破壊力を伴うことから、取り扱いはかなり難しくなってくる。一方、秒あたり約 1 グラムのエネルギーを地球表面全体で均すと、太陽光エネルギー相当になる。

色を波長そしてエネルギーを電子ボルトで表すことにより、豊かな色彩を表す身近で安全な可視光線も、波長が短くエネルギーが大きいため量が増えると危険な X 線やガンマ線も、全て単にスケールが異なるだけの電磁波に過ぎないことを理解できたものと思う。

この資料は、図 7 a のみを除いて、参照することにより自由に利用することができる。

#### 参考文献

- [1] Digital Image Processing, Jan Teuber, Prentice Hall, 1989.
- [2] Image Processing, Tinku Arharya and Ajoy K. Ray, Wiley, 2005.
- [3] Thomas B. Moeslund, Introduction to Video and Image Processing, Springer 2012.