

色温度について

岡山理科大学 総合情報学部 情報科学科 澤見英男
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。

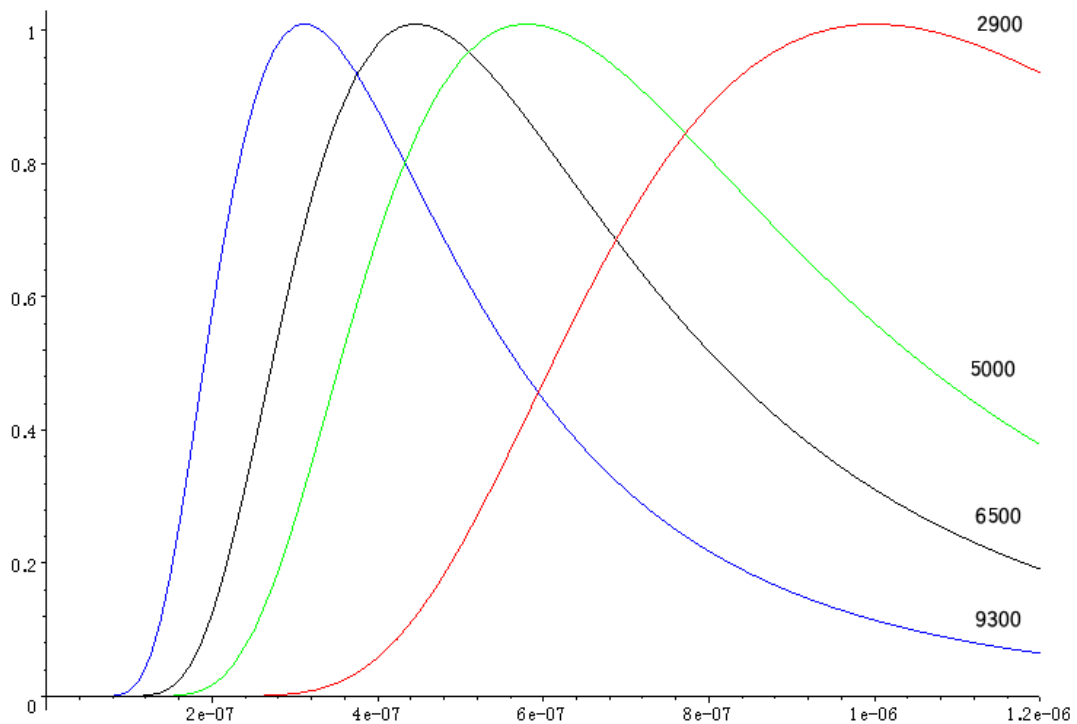


図1 黒体輻射のスペクトルと色温度 ($t=2900, 5000, 6500, 9300$ K)

横軸は波長 (λ) 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 (λ) は約 $400 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$ (nano meter = 10^{-9} m) である。そして赤色 (R) は 675 , 緑色 (G) は 525 , 青色 (B) は 475 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6500Kに相当する。これは真昼の太陽光は黒体放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5000Kに低下する。一方、室内照明用・白熱電球の色温度は2900K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6百万～7百万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の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(λ)が400nm～700nm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、ある温度における放射光を白色と考え、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525nm、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次のようになる。

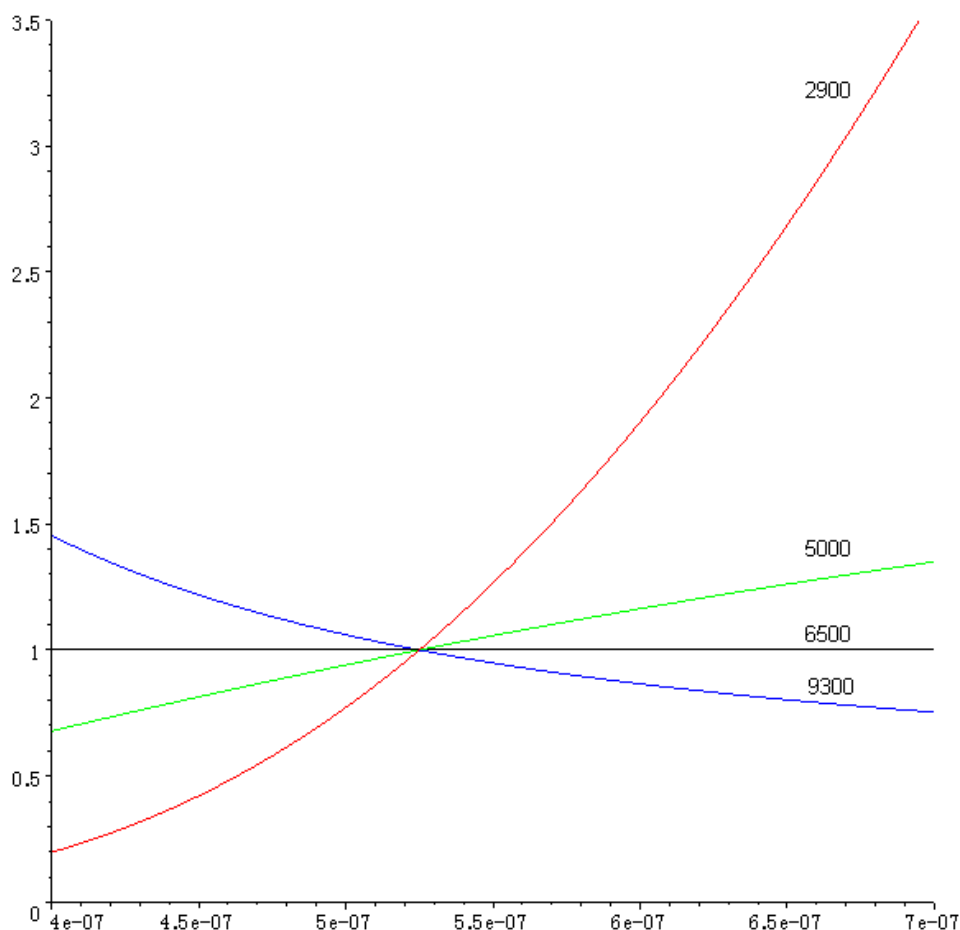


図2 黒体放射の相対的スペクトルと色温度（基準色温度6500K）

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、放射温度の下降に伴い赤くなり、上昇するにつれて青緑味がかってくる、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。

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。

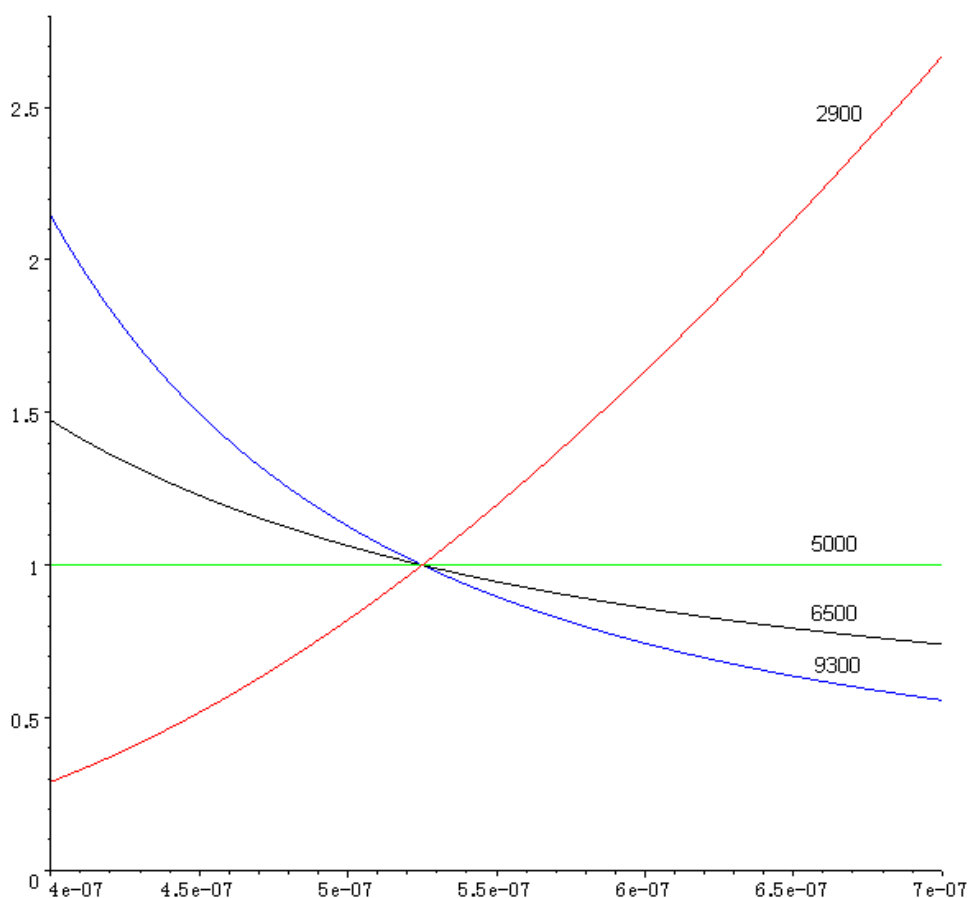


図3 黒体輻射の相対的スペクトルと色温度（基準色温度5000K）

横軸は波長(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、例えば昼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。

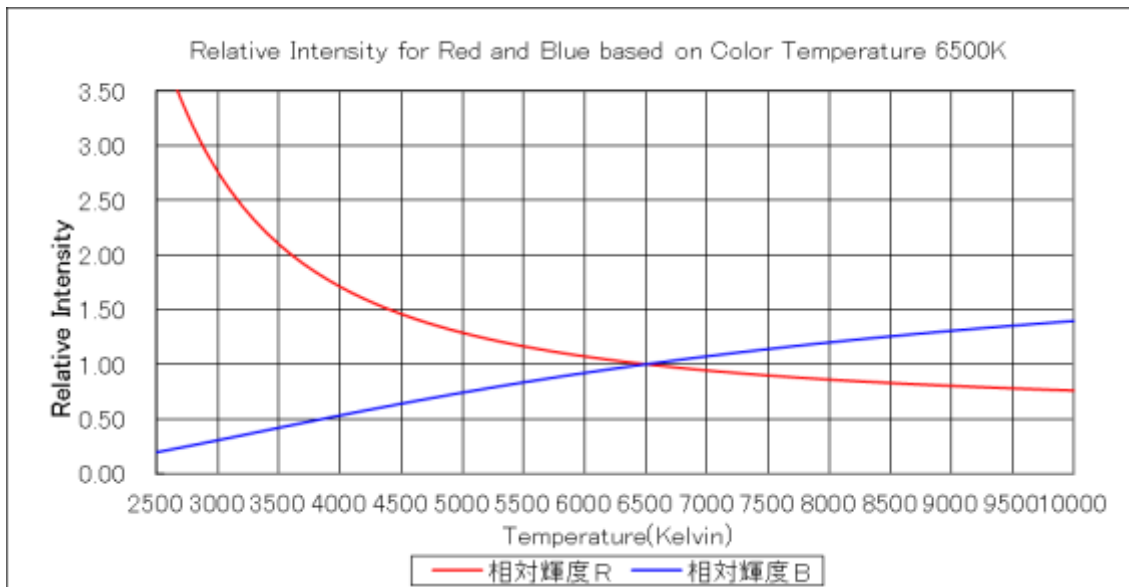


図4 a 色温度と三原色との関係 (CIE色温度6500K)

横軸は絶対温度(K) 縦軸はRGB各成分の相対的強度

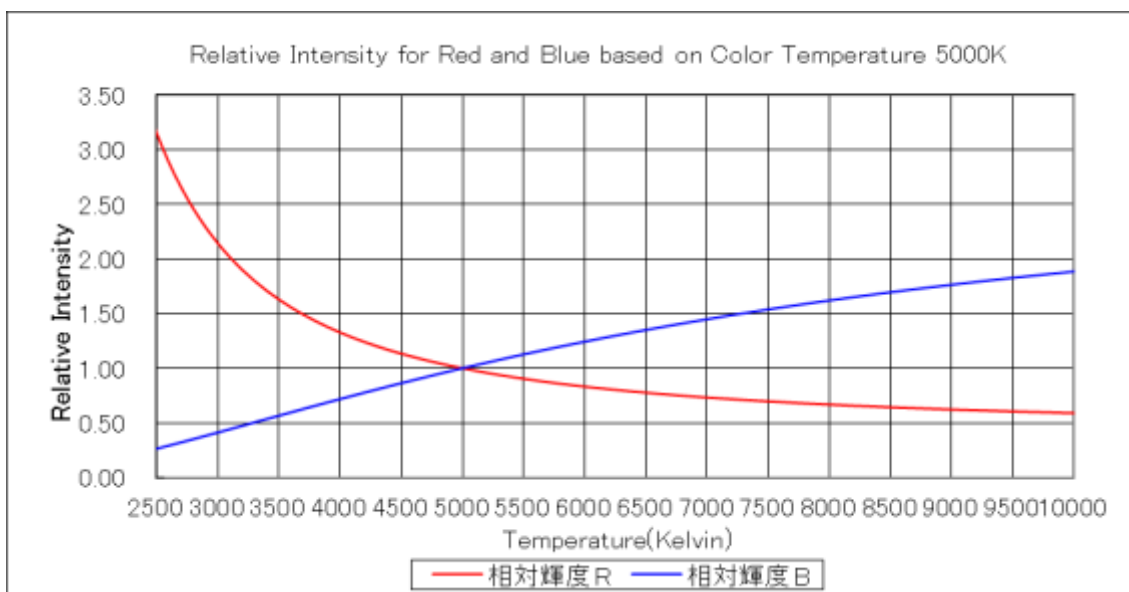


図4 b 色温度と三原色との関係 (CIE色温度5000K)

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な色として感じられるのかを定性的に示しておく。

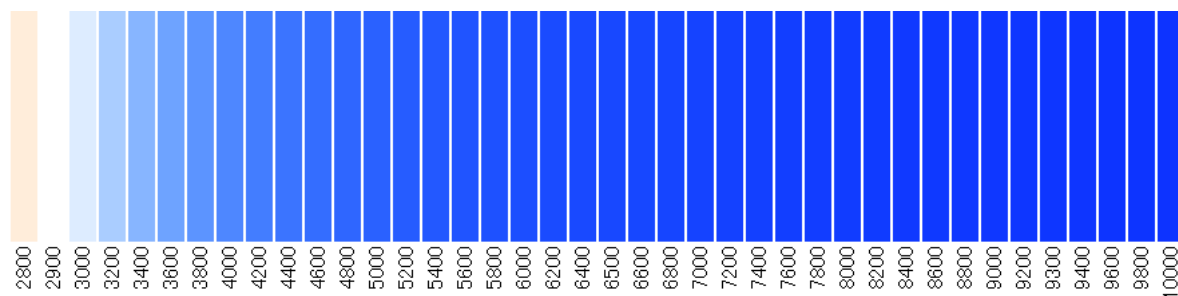


図5 a 各色温度に対応する白色光 (基準色温度2900K)
横軸の数値は絶対温度(K) 色温度2800Kの白色光は薄桃色

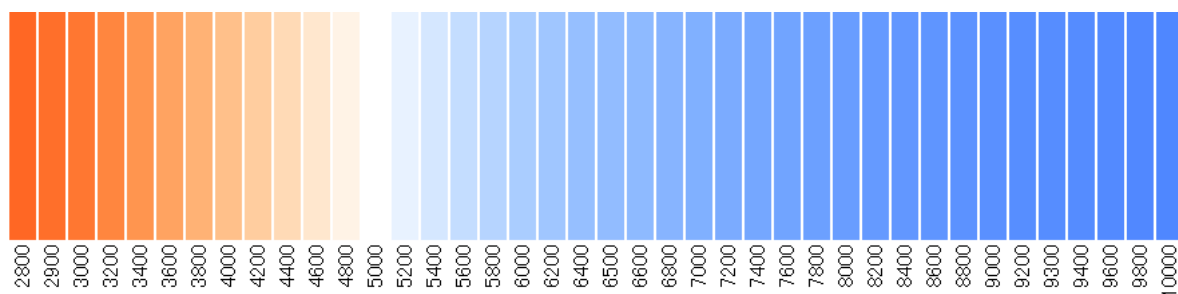


図5 b 各色温度に対応する白色光 (基準色温度5000K)
横軸の数値は絶対温度(K) 色温度5000Kの白色光のみ白色

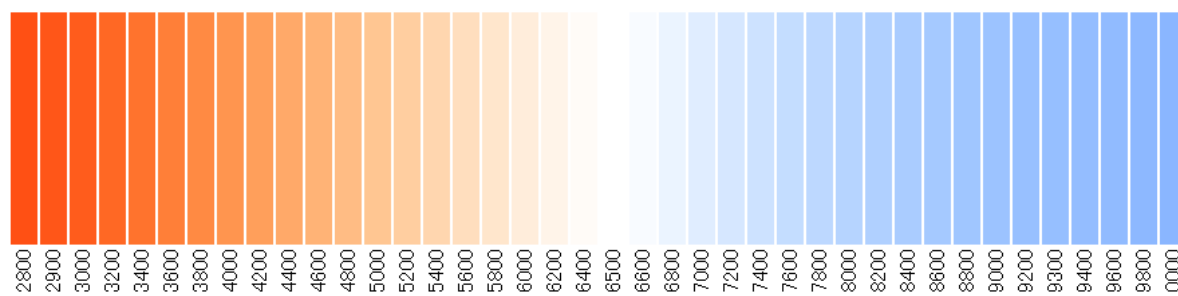


図5 c 各色温度に対応する白色光 (基準色温度6500K)
横軸の数値は絶対温度(K) 色温度6500Kの白色光のみ白色

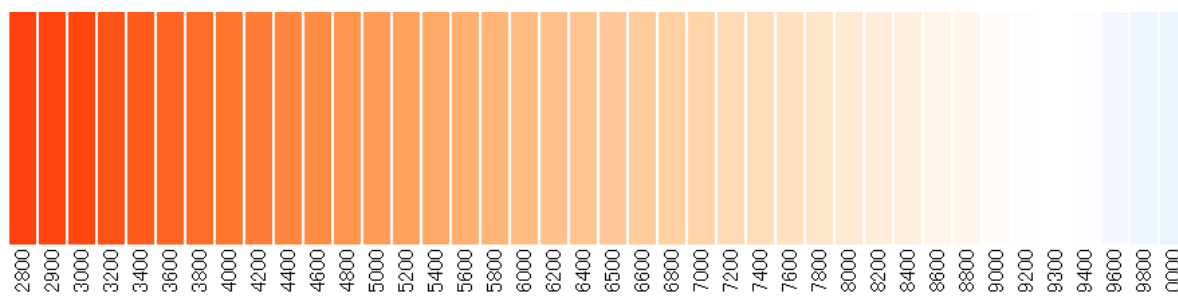


図5 d 各色温度に対応する白色光 (基準色温度9300K)
横軸の数値は絶対温度(K) 色温度9300Kの白色光のみ白色

基準の色温度を2900Kにすると(図5 a), 色温度2800Kの白色光は薄桃色に, 2900Kは白色に, そして白色光ではあるものの, 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5 b)と6500K(図5 b)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5 d)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。

ディスプレイで色温度を設定できるようにするためには、この調整に使うためのゆとりが必用となってくる。そのため、色温度一定で良ければRGB各256階調程度の表示性能で充分なのに対して、明るさとか色温度の調整の出来るような幅を持たせるようにしようとすると、1000階調以上の表示性能が必要とされることになる。

この辺りのことは仕様などを見て比較すると、ディスプレイ装置などの簡単な性能評価を、実際に使用すること無しにでも行うことができる。また、色温度をより高くして表示するためには、光源にRGBを用いるだけでは不十分で、Bよりも短波長になる光源を使うようにするのが良いかも知れない。それには、可視光線であることに限定すれば、紫色の光源を追加することなどが考えられる。一方、使用中のディスプレイに関しては、例えば各色温度に対応する白色光(図5)の変化が滑らかに表示できていないとか、白色の帯が2本以上になって見えるようであれば、再調整することをお勧めする。

ここで示してきたRGB値に基づく色温度の補正に必要な係数を、表計算ソフト「エクセル」を用い簡単に計算することができる。例えば、可視光線の波長を赤色(R)は700nm、緑色(G)は546nm、青色(B)は436nmにして、プランクの公式から、温度T(ケルビン)における白色光(黒体輻射)に関する各強度(IR, IG, IBセル)を以下のような計算式により求める(各定数および変数は特定のセルに対応させると良い)。

$$\begin{aligned} I_R &= (8 * \pi * h * C) / (\text{POWER}(0.700E-06, 5) * (\text{EXP}(h * C / (k * T * 700E-09)) - 1)) \\ I_G &= (8 * \pi * h * C) / (\text{POWER}(0.546E-06, 5) * (\text{EXP}(h * C / (k * T * 546E-09)) - 1)) \\ I_B &= (8 * \pi * h * C) / (\text{POWER}(0.436E-06, 5) * (\text{EXP}(h * C / (k * T * 436E-09)) - 1)) \end{aligned}$$

ただし定数値は、 $h=6.6260755E-34$, $k=1.380658E-23$, $C=2.99792458E+08$ となる。これより、特定の温度Tにおける緑色(G)を基準(値を1)にした場合の赤色(R)と青色(B)の相対的強度 (I_R/I_G および I_B/I_G) を計算できる。

同様にして、任意の温度t(ケルビン)における三原色の強度 (i_R, i_G, i_B) を計算し、この温度における赤色と青色の相対的強度 (i_R/i_G および i_B/i_G) も求めておく。こうして得られた相対強度の比から、温度Tおよびtとの間で色温度を変換する際の、赤色と青色の増減量を計算することができる。さらに作図機能(散布図)を選び、例えば、Tを基準温度にして何通りかの温度tに関し計算した値を用いることで、ここで示した様な結果(図4, 図5はhtml併用)を得ることもできる。

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。

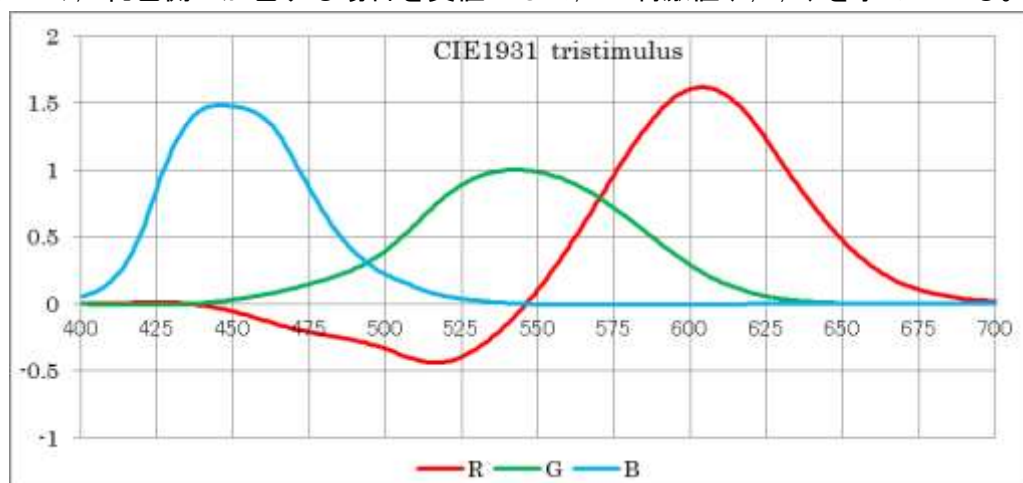


図6 特定波長の純色とCIE三刺激値
横軸は純色の波長で単位はnm, 縦軸はRGBの相対強度

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の加色混合に等しい(500nm: -0.3338R+0.3973G+0.2223B)。この明るさを表す値が負になることを嫌って、以下の式により、RGBからXYZ表色系の座標(正值)に変換する。

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

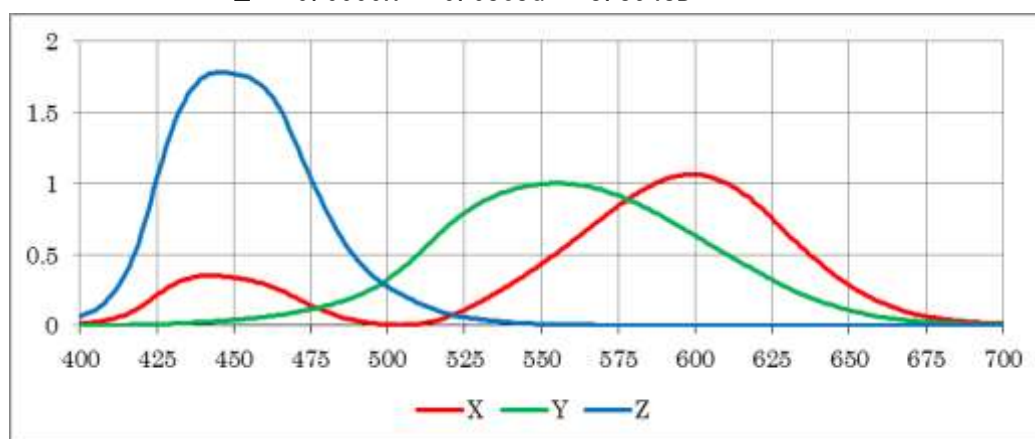


図7 特定波長の純色とXYZ値
横軸は純色の波長で単位はnm, 縦軸はXYZの相対強度

XYZ座標値を正規化して、明るさを一定にした色空間「xy表色系」へと変換する。

$$\begin{aligned} x &= X/(X+Y+Z) \\ y &= Y/(X+Y+Z) \end{aligned}$$

赤色(R)を波長7000nm, 緑色(G)は5461nm, 青色(B)を4358nmに近似して, xy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, (CIE1931)色空間領域内に重ねて描くと次のようになる。

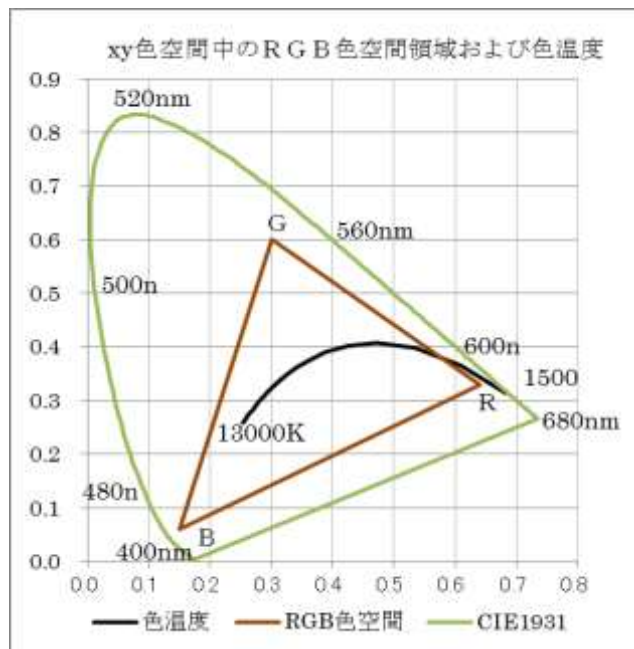


図8 CIE1931標準表色系のRGB色空間領域と色温度
横軸はx, 縦軸はy, 高い色温度では青緑色, 数値は純色の波長と色温度

標準表色系の色空間領域は, 周辺ほど歪み膨らんだ形をしているが三角形のRGB色空間領域よりも広く, 身近な例としてはレーザー光線のような, 緑より緑, 赤よりも赤, 青より青といった豊富な色の存在を示している。これは, 帯スペクトルを構成しているいわば無数の線スペクトル即ち純色を, 純色ではない狭帯域の帯スペクトル3本, 三原色(RGB)の加色混合により近似していることから, 当然の結果と言える。

一方, 先に示した非標準表色系では赤色(R)の波長を675nm, 緑色(G)は525nm, 青色(B)を475nmにしている。この非標準表色系による色温度の定性的な変化を以下に示す。先の結果(図5c)と較べ, 計算に用いたRGBの波長が異なることから緑成分が減少し, 温度の変化に伴う印象が少し違うように感じられる。

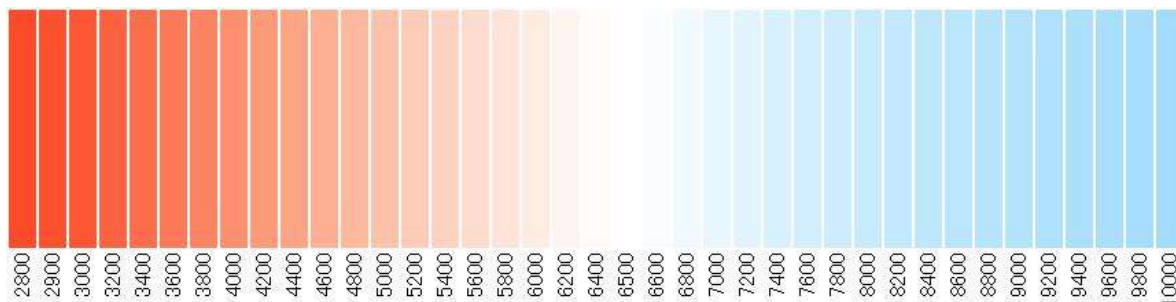


図9 各色温度における白色光(基準色温度6500K)
横軸の数値は絶対温度(K) 基準は色温度6500Kの白色光

この、いわば標準とは異なる波長を用いた非標準色温度特性をCIE標準表色系の色空間領域内に描くと以下ようになる。CIE標準表色系に準拠した場合(図9)よりも僅かだけ下にずれていることから、緑成分のほんの少し減少していることなどが分かる。

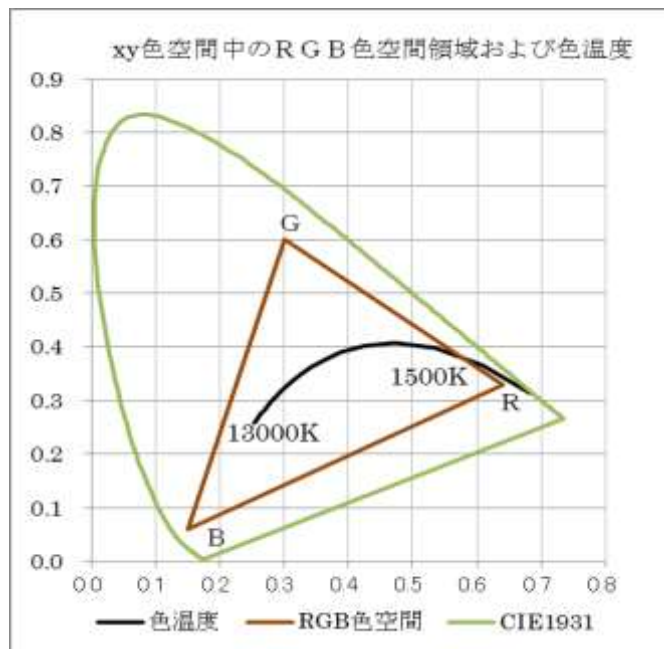


図10 CIE1931標準表色系のRGB色空間領域と非標準色温度
横軸はx, 縦軸はy, 高い色温度では青緑色, 数値は色温度

三原色の波長を少し変えた白色光の性質に関して、黒体輻射に基づく計算により簡単な比較をした。これより、同じ照明光を用いたとしても、波長に関する感度特性に十分な配慮をしていない三原色センサを用いると、視覚特性に合わせてセンサや色フィルタを校正し撮影した場合と比較し、得られる画像の色に偏りの出てしまうことがわかる。

一般に、視覚特性を反映したCIE標準表色系を基準として用いることが多い。この基準に合わせていない場合には、白色光からの偏差が大きくなるにつれて、対象物の色が本来とは異なる不自然な色に見えてしまうことになる。また、例えば光量が増えたなどの原因で青色センサが飽和するようなことがあると、青の値が相対的に小さくなることから緑と赤の側に偏るため、結果として、黒体輻射光なのに黄色に見えたりもする。

ところで色温度が低くなるにつれて、青と緑の成分は赤成分と比較し大幅に減少してくることから、赤を中心とした狭帯域帯スペクトルと黒体輻射とは良く似た色に見えてくる。しかし、黒体輻射は単一波長の電磁波ではないことから、測定により確認した訳ではないが、色温度が低くても純色の赤(波長675nm)にはならないと考えられる(図8, 図10)。このことは、中心波長が700.0nmの狭帯域帯スペクトルでもある赤(R), 中心波長546.1nmの緑(G), 波長435.8nmに対応する青(B)の三刺激値による加色混合を用いて特定の色を表す場合、線スペクトル純色の赤を表す計算式(675nm : 0.1065633R + 0.0002705G - 0.000000B)からも明らかである(図6)。

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 ν は光の速度(2.99792458×10^8 メートル/秒)と波長との比を表している。一方、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($E = qV$)と比較することにより、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(400~800ナノメートル)と軌道エネルギーの差、電子ボルト(eV)との関係を知ることができる。可視光線の波数では、このような放射・吸収は一般に100パーセント近い効率を示す。

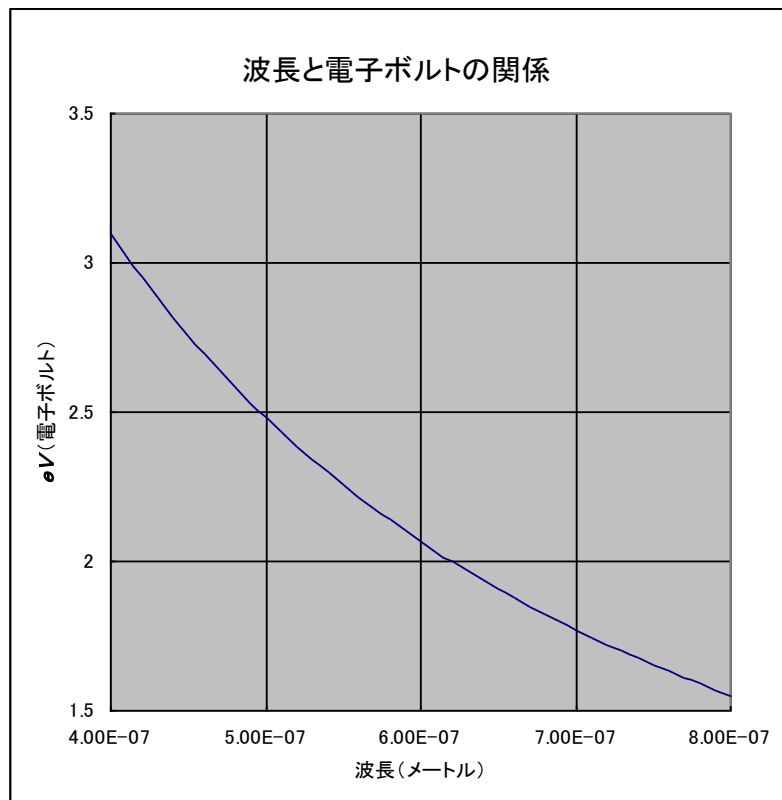


図 1 1 波長と電子ボルトとの関係

横軸は波長(400~800nm) 縦軸は電子ボルト(eV)

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 2.7 ボルト以上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 14 電子ボルト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が

ら炭水化物(CH₂O)と酸素を得るという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、核分裂の確率を秒当たり数千万分の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、秒当たり約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。また、光速で空間を突き進んで行く電磁波は進路中の物質とエネルギーに応じた相互作用をすることから、可視光線であれば我々の身の周りの認識に必要な情報を画像として、一方、X線とかガンマ線の様な高エネルギー電磁波であれば、遙か彼方にある宇宙の極限における情景をも届けてくれていることに得心がいったのではないだろうか。

この資料は、商業目的以外であれば、自由に利用することができる。なお最新の資料がホームページ <http://cafe.mis.ous.ac.jp/sawami> にて公開されている。