

光源の色温度

土井 貴俊, 大西 佑奈
Takatoshi DOI, Yuna OHNISHI

1 はじめに

色温度という言葉は、光と深く接する我々の生活において重要な意味を持つ言葉である。色温度自体の歴史は浅いものの、太陽光による色温度は我々の生活習慣リズムと密接な関係を持っている¹⁾。人体に与える影響を考えた研究も多くなされており、どのように光源の色温度を変化させれば我々人間にとっていい効果を生むのかが判明しつつある。

色温度とはどのようなものか、色温度という言葉が使われるようになった経緯にはどのような技術の進歩があったか、あるいはどのような研究がされてきたかを本稿で取り上げたい。

2 色温度とは

2.1 色温度の定義と歴史

18 世紀の終り頃、鉄の精錬に溶解した鉄の温度が、鉄から発せられる光の色と関係があることが知られていたが、その作業は熟練工が経験から目で確認していた。溶解した鉄の温度を測る温度計も存在しなかったため、そのような個人の作業では精錬の成果に違いがあり、大量に高品質な鉄の精錬ができなかった。そこで、溶解した鉄の温度を機械的に測れないかと考えられ、鉄を熱したときに発せられる光のスペクトルが研究された。温度を持つことで光の放射現象があることは鉄に限らず、我々の身の回りにある物質でも、温度さえ持っていれば赤外線という形で放射されている。ここで鉄だけではなく、すべての物体に対して光の放射現象を説明するために、代表的な物体として、黒体という物体が考えられた。

黒体が熱を持ったときに発する光を黒体放射と呼び、黒体放射の光の色とその時の黒体の温度の対応関係が色温度である。Fig. 1 に色温度のカラーチャートを示す。

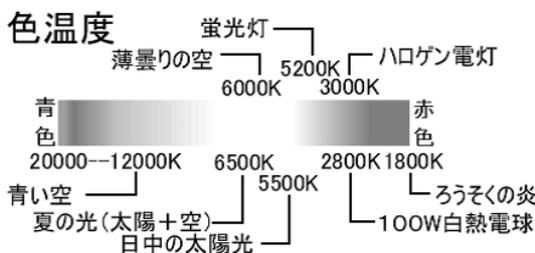


Fig.1 色温度のカラーチャート (参考文献²⁾ より参照)

本章では色温度の定義を説明するため、黒体について述べ、実際には空洞放射という実験によって色温度が定義されることについて述べる。

2.1.1 黒体

黒体とは、すべての光を吸収する物体であり、その性質から我々の目には黒く見える。このことから黒体、あるいは黒体物質、黒色物質といった言葉で呼ばれる。現実にはブラックホールがその存在に最も近いが、完全な意味での黒体 (完全黒体) は存在しないといわれている。仮に完全黒体が存在したとしても、完全黒体はすべての光を吸収してしまうため光が放射されず、実際には放射される光が観測され得ない。したがって、現実には空洞放射という実験によって黒体放射が観測される。

2.1.2 空洞放射

空洞放射とは、ある大きさの真空の空間を光を遮断する壁で覆い、それを炉で加熱し、小さな孔をあけて分光器によって光を取り出す、というものである。Fig. 2 に空洞放射の模式図を示す。

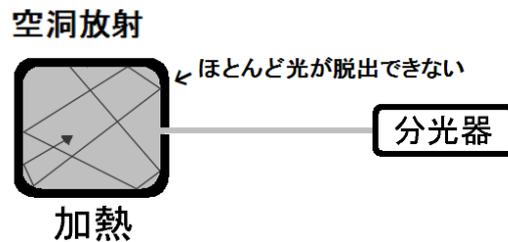


Fig.2 空洞放射の模式図 (参考文献²⁾ より参照)

空洞放射が現実にも最も黒体放射に近いことを示したのは、1859 年に発見されたキルヒホッフの熱平衡の法則である。この法則によると、空洞放射を観測するために必要な物質は、不透明であれば材質に依らない。空洞放射を観測し、その時の温度と光の色の対応を定義したものが色温度である。

空洞放射による観測結果をもとに、黒体放射を数学的理論で表現したのがプランクである。プランクは 1900 年に黒体放射によってられる光の強度^{*1}を全波長領域で正しく計算できるプランクの放射方程式を導出した。Fig. 3 はプランクの法則を用いて黒体放射の光の強度を求めたものである。ただし、最大値が 1 になるように正規化して計算している。

我々の目はおよそ 380~780nm の波長の光を可視光として認識するため、黒体放射の光の強度の分布のうち、この波長域に入るものが我々の目に可視光として見えることになる。光の強度の分布が、380nm に近い短波長の光

*1 単位面積、単位周波数あたりの熱量。
単位はジュール 毎立方メートル 毎ヘルツ。

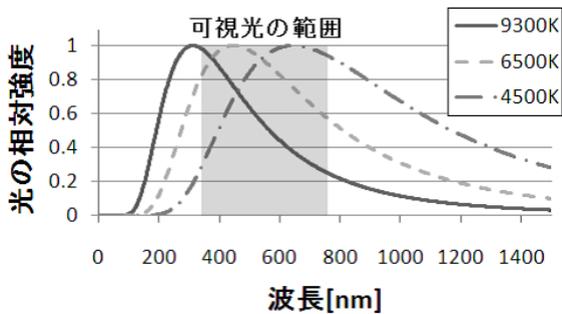


Fig.3 温度別による黒体放射の光の強度 (出典：自作)

の強度が大きければ青く見え、780nmに近い長波長の光の強度が大きければ赤く見える。このことを利用して色温度という指標の表現に用いられているのである。例えば、Fig. 3における9300Kの曲線は、光の強度の強い部分が赤く見える長波長より青く見える短波長の方が多くなっている。このため、色温度9300Kは我々の目には青白く見える。

2.2 色温度の測定方法

現実に測定器などで測定される色温度は、JIS規格によって定められており、具体的な方法はJIS規格Z8725に記載されている。これを要約すると、次の手順によって色温度を求められる。

1. 色彩計、色彩照度計、色彩輝度計などによってXY色度値を求める。
2. XY色度値をuv色度値に変換する。
3. 色度値間の距離が、最も近くなる関係にある黒体放射のuv色度値を求める。
4. その黒体放射のuv色度値に対応する絶対温度を求める。

以下、具体的に説明する。

● XY色度値を求める

光源の色を測定する機器には色彩計、色彩照度計、色彩輝度計などがある。これらはCIE(国際照明委員会)が定義したXYZ表色系におけるXY色度値を求めるものである。XYZ表色系は、RGB表色系においてマイナスの値を用いなければ表現できない色があるという問題を解決したものであり、CIEが定める表色系の基本となっている。

● uv色度値に変換

CIEによる規格をもとに、測定した光をXY色度値に算出し、これをさらにCIEが定めるLuv表色系のuv色度値に変換する。Luv表色系で表されるuv色度図はUCS色度図(均等色度図)と呼ばれ、XYZ表色系の波長間隔の均等性を改善したものがLuv表色系である。Luv表色系は、XYZ表色系ではXY色度図上で、我々の感覚よりも緑の波長領域が青、赤に比べて大きくなっているものが修正されている。つ

まり、Luv表色系ではuv色度図上で色同士の距離が我々の感覚に近い表現になるようになっている。具体的には、簡単な四則演算の式でXY色度値からuv色度値に変換することができる。

● 最短距離になる黒体放射軌道を求める

黒体放射による光も温度別に色度値を持っており、黒体の絶対温度と色度座標の関係というデータテーブルが定義されている。この値をuv色度図中にプロットすると、曲線を描くことができる(黒体放射軌跡)。手順2でXY色度値から変換したuv色度値に対して、最も近い黒体放射軌跡上の一点を計算し、その黒体放射のuv色度値に対応する絶対温度が相関色温度と呼ばれるものである。Fig. 4にuv色度図上の黒体放射軌跡を示す。Fig. 4における黒体放射軌跡に対して垂直なラインが、その光の相関色温度である。

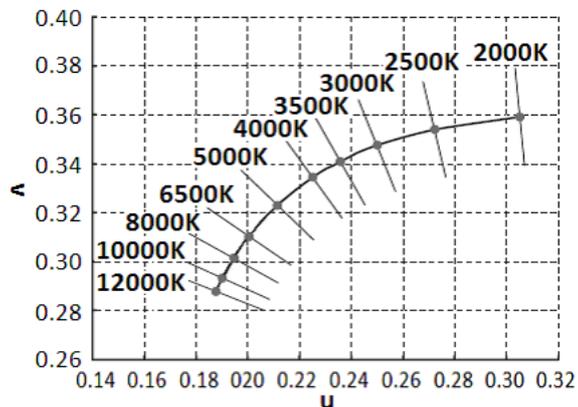


Fig.4 uv色度図上の黒体放射の軌道(参考文献³⁾より参照)

色温度について、正確には黒体が放射できる光と同じ色の光源の光しか色温度で表すことはできない。簡単に言うと、現実には光源はすべて黒体ではないため、Fig. 1で表されるカラーチャートの色は現実の光源の光の色温度を表すことができない、ということである。黒体以外の光源における色温度は厳密には相関(相対)色温度と呼ばれ区別される。したがって、光源の色温度を測定する場合、ほとんどの場合、相関色温度を求めることになる。

さらに相関色温度は、黒体放射の光からuv色度図上で0.02以内の範囲にあるものまでが相関色温度で表せる範囲である、とJIS規格によって定義されている。この範囲外の色度の光は色温度、あるいは相関色温度で表すことはできない。例えば、緑などの色を色温度に表すことはできない。

測定手順を具体的に例を出して示す。ある光源の色を色彩計を用いてXY色度値を求め、uv色度値に変換したところ $u=0.213596$, $v=0.323119$ であった。この値に最も近い黒体放射のuv色度値を求めると、 $u=0.212334$,

$v=0.323230$ で表される 5000K の uv 色度値に最も近かった。したがって、この光源は相関色温度 5000K である。

なお、本稿では以降で相関色温度を特に区別せず、単に色温度と表現する。

3 色温度の違いによる影響

我々が普段生活する中においても色温度は重要な要素である。例えば、普段我々が目にする太陽光の日中の光は 5000k ~ 6000K であり、最高で 6500K といわれる。朝、夕の光は 2000K 程度となっている。このため、照明において、高い色温度の光源は活動的な場面で多く用いられ、低い温度の光源は落ち着いた場面で用いられることが多い。また、6504K は CIE によって標準の光 D65 と定められ、色温度の基準として用いられる。

本章では照明器具などにおいて、色温度の変化がどのような意味を持つか、あるいは我々人間にとって光源の色温度の変化がもたらす影響について述べる。

3.1 家電製品における色温度の違い

色温度の違いが解りやすい例として照明を挙げる。我々が普段生活する中で用いる照明には、電球色、昼白色、昼光色のものがあり、それぞれ順に 3200K, 5200K, 7200K の色温度を持っている。これらの照明は生活の場面によって使い分けられ、照度が低く色温度も低い照明はリラックスできる空間に、照度が高く色温度も高い照明は覚醒を促しアクティブな空間になる。照明は、テレビスタジオやライブハウス、居酒屋といった場面で場の雰囲気や左右する要素であり、照明の色温度の違いは空間を演出するものとしても利用されている。近年では LED 照明が用いられ始めたこともあり、色温度を調節可能な照明も開発されている⁴⁾。

カメラにおいてはホワイトバランスという形で色温度が重視される。写真撮影を行うと、色かぶり*2という現象が起こることがあるが、近年のデジタルカメラの多くにはホワイトバランス機能が備わっており、撮影写真に対して色温度の補正が可能である。

また、パソコンやテレビのディスプレイにも同様の色温度設定機能が搭載されているものが増えてきている。テレビモニタは、諸外国においては CIE の定める標準の光 D65 (6504K) が標準色温度として用いられているが、日本では NTSC-J*3 が 9300K を標準の色温度と定めている。このような違いは民族や肌の色の違いから、白として見える色が違うらしい、ということが理由とされるが、詳細は不明である。ただし、人間の目には色順応*4という機能が備わっているため、多少の色温度の違いは無視してディスプレイを見ることが出来る。また、地上デジタル放送など、ハイビジョン放送は日本でも D65 が採用されている⁵⁾。

*2 ここでは実際の目で見たものとは色味が違った写真になること

*3 日本テレビジョン放送方式標準化委員会

*4 同じ色を見続けていると、その色味が褪せて見えてくる視覚順応

3.2 色温度が人体に与える影響

光源の色温度が、その生活下にある人間に対して影響を与えることについても多く研究されている。以下に二つの研究例を示す。

- 照明光温度の日内変動が人間の脳波に与える影響⁶⁾
この研究は、室内で照明の色温度条件を変えることで、被験者にどのような反応があったかを調査したものであり、その内容は二つの手順を踏んでいる。まず先に被験者が室内照明の色温度を調節可能にした実験室で 9 時間の活動状況を確認する。その色温度調節データから生理心理的指標を用いて、色温度を自動制御できるように計算される。次の手順で、色温度を固定した場合と、色温度を自動調節にした時の、被験者の主観評価を 10 分毎、脳波を 1 時間毎に調べて比較している。この実験報告によると、色温度が自動制御の環境では、脳波計測において安静時に見られるアルファ波や、入眠時に現れるシータ波が、固定条件よりも有意に高くなることが報告され、考察として、色温度自動制御条件は、固定条件よりもリラックスした照明条件であることを示唆するとある。

- 照明条件が精神的健康に与える影響
メラトニン分泌と光源の色温度が関係する⁷⁾ ことが報告されており、高色温度ではメラトニン分泌が抑制されることがわかっている。この報告では、夜間 1:00 から 2:30 までの間に、被験者に対して顔面の照度が 200lx*5 となるようにした上で、色温度の条件を変えた時のメラトニン分泌量を比較している。Fig. 5 にその関係を表した図を示す。

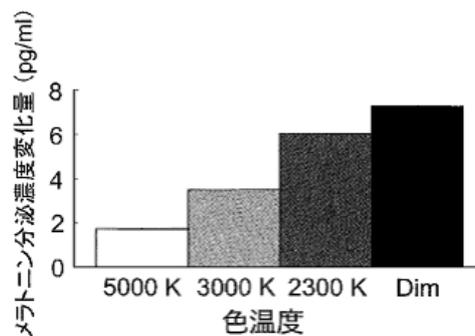


Fig.5 色温度とメラトニン分泌の関係 (参考文献⁷⁾ より参照)

これは、我々の生体リズムと照明の輝度、色温度が大きく関わっており、睡眠と覚醒という重要な生理反応と関連があるということの証明である。

さらに、室内照明の色温度が高いほどコルチゾール*6分泌が増え、メラトニン*7分泌が抑制される研

*5 ルクス [lx] は照度の単位。明るさ。

*6 ストレスに対抗するためのホルモン。ストレスホルモン。

*7 眠気をもたらすホルモン。

究報告⁸⁾がある。この研究では、通常のオフィスを模した実験室で、輝度、色温度の照明条件を変える実験を行うことで、ここでこのような影響があることが明らかとなった。

これらの作用は、人間の神経系と深いかわりがある。人間は高い色温度の光に晒されると交感神経が優位になることで緊張感を生み、低い色温度の光に晒されると副交感神経が優位になりリラックスすることができる。このような反応は、心拍変動性という自律神経機能評価の方法から判明した。これは、心臓は自律神経によって調節されているため、心拍数の変動を調べることで自律神経系への反応がわかるというものである。さらに、心拍変動性は照度条件ではなく、色温度条件で変わることが示されている⁹⁾。

このような反応は、生体の恒常性（ホメオスタシス）を維持するための反応とされ、光の色温度が我々人間の生理反応に影響を及ぼす原因となっていることを示している。

4 今後の展望とまとめ

色温度とは、簡単に述べれば光源による色味、色合いを表現する指標である。光源の色温度は我々人間の視覚的に与える印象を変えることができるため、色温度の調節は光に関わる幅広い用途で重要とされてきた。デジタルカメラの写真やテレビモニタといった機器では、色の表現に大きな違いが出てくるため、適切に色温度の調整を行わなければ、その出力を我々が見て感じる印象に大きな違いが生まれる。

また、光源の色温度を調節することで睡眠に関するホルモンバランスを整えることも可能であり、この効果は我々の生活の質に関わるものである。特にオフィス環境で現在使われている高色温度の照明は、高い覚醒を促す反面、持続して高色温度の光に晒されることでストレスホルモンが増大し、作業効率の低下が懸念される。

そこで、現在 LED 技術の発達により LED を光源とした照明が普及されていくことが期待されているが、もし LED が照明として用いられるのなら、自由に色温度を調整できる LED 照明の開発はオフィス環境の改善にとって大きな進歩である。また、人によってその時々好まれる光環境は異なっているため¹⁰⁾、可変化することで、その時々に応じた個人によって最適な照明を演出することが可能となる。これは照明の持つ心理作用を自由に意図的に操作できるということであり、次世代の照明は照明の持つ心理作用をうまく使うことで生活の質を上げ、知的生産性を向上させる効果が期待される⁷⁾。

今日、環境として光源のもつ影響がテーマとされた研究が多く行われ、その中で特に照度、色温度は照明による室内環境の構築において人間の心理作用と大きな相関を持つことが明らかになってきている。このことは、今後照明において、色温度を利用した様々な研究、開発が行われていくことを助長すると予想させるものである。

参考文献

- 1) 食空間および睡眠空間の生理学的アプローチによる環境設計に関する研究 - 近藤雅之，
<http://nwudir.lib.nara-wu.ac.jp/dspace/bitstream/123456789/1372/1/AN10140874vol25pp197-201.pdf>
- 2) 電気の歴史イラスト館，
<http://www.geocities.jp/hiroyuki0620785/>
- 3) 色温度のはなし - 水口淳，
日本写真学会誌 2006 年 69 巻 5 号 pp352-355,2006
- 4) 【CEATEC2009】色温度を任意に調整できる LED 照明、パナソニックが参考出品 - EE Times Japan，
<http://eetimes.jp/news/3369>
- 5) デジタル放送用受信装置 標準規格（望ましい仕様），
社団法人 電波産業会 pp32, 2009
- 6) オフィス空間における照明色温度の日内変動が生理心理機能に与える影響，
日本生理人類学会誌 Vol.5 特別号（2）第 44 回大会要旨集 pp30-36, 2006
- 7) 光とメラトニン - 野口公喜，
照明学会誌 第 93 巻 第 3 号 pp134-137, 2009
- 8) The Background Luminance and Colour Temperatures Influence on Alertness and Mental Health [Proceedings of the 26th Session of the CIE] - Goven, T., Laike, T., Pendse, B. and Sjoberg, K.: , pp.D6-811 2007
- 9) 光の質で人間の生理反応は影響されるのか - 勝浦哲夫，
照明学会誌 第 84 巻 第 6 号 pp350-353, 2000
- 10) 好みの色環境として選択された照度と色温度条件の日動変化 - 森田健，
日本建築学会大会学術講演梗概集 pp12-13, 2000.11