

# 色計測で新需要を生み出すLED照明

ジェフ・ヘクト

LED光源を最大限に活用するには、色計測と基準の改良が必要である。また、従来の明所視と薄明視の範囲で目の感色性がどのように変化するかを理解する必要がある。

新しい光源と人の視覚の研究では、色計測と基準の継続の見直しが避けられなくなっている。目的はどのように色が見えるかの定量化を改善することであるが、それはあいまいなところがある。光源のスペクトル、見ている対象の反射スペクトル、人の眼の感覚にそれは依存する。また、最後の点は、われわれの五感に依存するので、本質的に主観的である。

色計測の基本概念は、フランスの頭文字CIE (Commission Internationale de l'éclairage)で知られる国際照明委員会が、数十年前に体系化した。当時普及していた光源は太陽と白熱電球であったので、色温度などの概念が確立された。これは、様々な温度で黒体の連続スペクトルと比較することで照射光の色を計測するものである。それは当時でも近似値であり、初期の基準は蛍光灯で調整される必要があった。現在、色基準は固体LED照明をカバーするように調整されつつある。

街灯で使用されているLEDの青色が勝るスペクトルは、別の基準に対して課題となっている。道路照明の仕様は、明所(日中)視と暗所(夜)視の間の移行について時代遅れの仮定に基づいている。

## 色温度

光源の色を計測する最も簡単な方法は、光源スペクトルと黒体光源のスペクトルを比較することである。これによって相関色温度が得られる。相関色

温度とは、光源スペクトルに最も近い色バランスを持つ黒体光源の温度(ケルビン度)として定義された1つの数字である。この数字は一般にLED電球の色を規定するために使用される。色温度2700°Kの意味は、電球が赤色が濃い、つまり「温かい」スペクトルを持つということである。これは、通常室内照明で好まれる。色温度3000°Kは、もっと黄色が強、「暖白色」と言えるかも知れない。仕事場は、通常色温度が4000°K程度の「クールホワイト」の光で照明される。青色純度の高いLED電球の中には、色温度が太陽の5700°Kよりもはるかに高い色温度を持つものもあり、目には青みがかって見える。

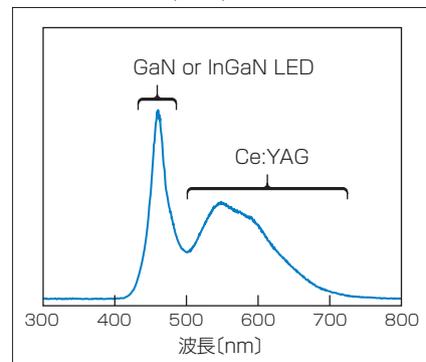
色温度スケールの平易さはコンシューマー製品には魅力的であるが、それは本質的に不正確である。LED発光は黒体放射曲線から程遠いからである。固定色のコンシューマーLED光源は一般

に、鮮やかな青色LEDの光と、黄色を中心とする広帯域発光のリン光とを結合している。リン光を励起するために青色の光をさらに多く使うと、色温度は低下する。赤いリン光、つまり赤色LEDを加えると一段と低い色温度を出すことができる。可変色電球は、赤、緑、青色のLEDを結合しており、その相対出力を変えると色温度が変わる(図1)。

照明業界はもっと正確な計測と基準を使って、製品が確実に見た目によく見えるようにする。通常、その意味は、目には白色に見えるような混合色を発光するということであり、またそのような混合は色温度に依存する。その目的を達成する重要手段は、色度で客観的に色を規定することである。色度は2つの独立した質、色相と彩度に依存している。これらは二次元「色度空間」にプロットされる(図2)。色度空間は、黒体スペクトルと黒体曲線がクロスする線で混色もプロットする。ここでは、相関色温度は一定である。

技術についていくために基準は進化し続ける。米国規格協会(ANSI)は、

(a) Conventional phosphor-based white LED



(b) RGB LED

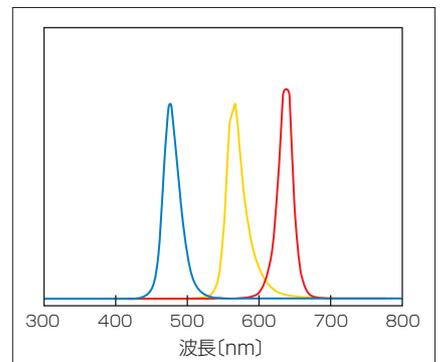


図1 青色LEDは、リン光を励起して長波長側で発光させ、青色光が白色光となるようにできる(a)、また赤、緑および青色光を統合して白色光を生成するようにできる。3色の相対出力の調整により波長をチューニングできる(b)。他の変更も可能。

2008年に固体照明色度基準の草案を発表した。最終版は2010年、さらに2013年と2015年に改訂版を出している。これらの変更では、指定された白色範囲2200は6500°Kに拡張された<sup>(1)</sup>。現在、特別グループがさらなる調整に取り組んでいる。LED照明コンサルタント、ジェンチョン・チアオ氏によると、主要な問題は最近の研究によって明らかになった、人々が白色と感じるものと白色光として好ましい色合いとの違いを調整することである<sup>(2)</sup>。

## 演色とメタマー

ほとんどの物体は光を反射する、通常われわれは色は物体に備わっていると考え。しかし、反射された光の実際のスペクトルは、光源と物体の反射性とのスペクトルの所産である。光源を取り換える時われわれはその違いに気づかない。これは、物体が特定の色を持っていると考えているからである。さらに、光源を並べて比較しなければ、その違いを認識することはない。

この効果は演色と言われており、特定の光源を使うことの影響は、その演色評価数(CRI)によって計測される。CRIは、光源が照射する物体と白熱電球のような黒体参照光源との色の違いを比較する。色が正確に同じに見えるなら、CRIは100である。一般的なLEDは約80、これは一般に許容範囲にあると見なされる。しかし、照明の問題の複雑さのために、この単純な数値尺度の値は疑問視されてきた。

1つの問題は、違うスペクトルの光源を眼が同じ色として感じることができ、つまりメタメリズム効果である。これは、脳が眼の赤、緑、青の受容体の反応のバランスをとって色相、つまり光の色を決める仕方からくるものである。着色物からの反射がス

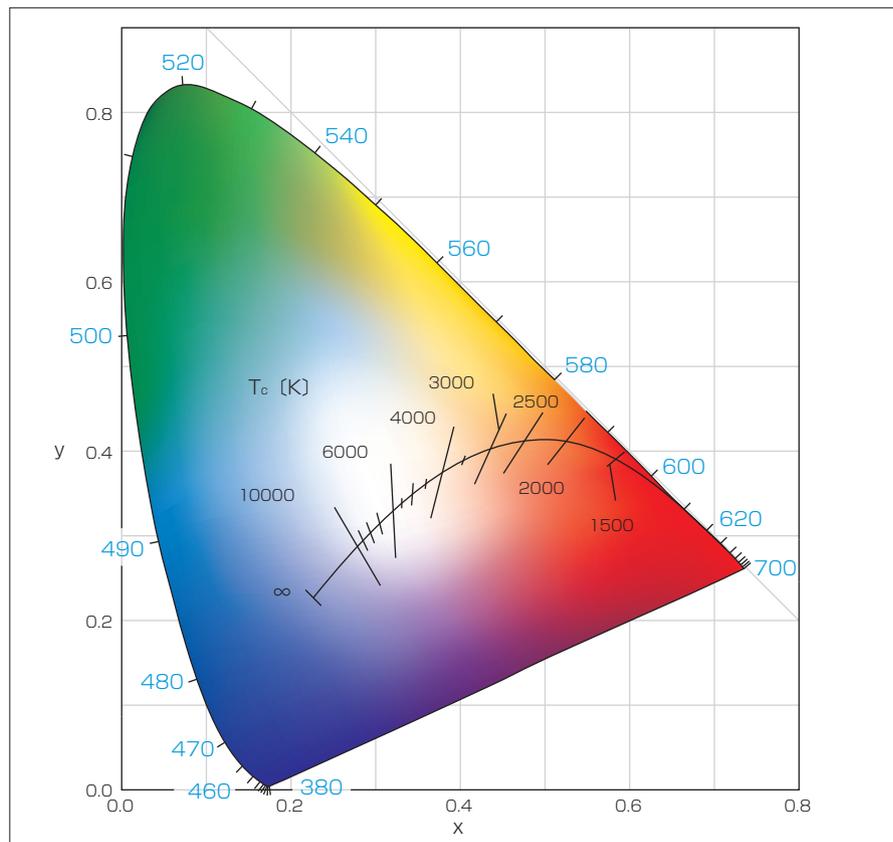


図2 色度ダイアグラムが示しているのは、色相と強度に基づいた色と、差し込み図で示した、ある色温度の光源に対応する領域との関係である(出典はWikimedia Commons/User: PAR)。

ペクトルを変える、また眼には違ったように見えるかも知れない。

ほとんどのLEDランプの特殊問題は、強いが狭い青色輝線を使ってリン光を励起するとCRIが80程度に下がることである。理由は、その青色が、紫の短い方の波長で、また長い方のブルー・グリーン波長で実質的に光を発しないからである。米ソー社は、バイオレットLEDおよびリン光の多様な混合を使って可視スペクトル全体で発光する固体ランプを作製し、CRI 95のより均一なスペクトルを生成している。しかし演色の改善は効率の犠牲の上に成り立つ。カリフォルニア大サンタバーバラ校(UCSB)の固体照明センターの共同ディレクター、ソー社創始者、中村修二氏によると、CRIを80か90に高めると、ワット当たりのルーメンは20%減少する<sup>(3)</sup>。

演色基準が特に問題になるのは、ナローバンドとブロードバンドのLEDを混合して白色光を生成する電球の場合である。この混合光を反射する物体は目にはよさそうに見えるが、CRIスケールは低い、と米データカラー社のマイケル・ブリル氏は言う。同氏および他の人々も、演色基準を変更してその問題に対処するように勧めている。CIEの委員会、北米照明学会(IES)、国際照明協会はそうした基準に取り組んでいる。

## 薄明視とハイウェイ照明

街路照明のLEDの利用から、また別の計測問題が出てきた。すなわち、昼光と真っ暗闇の強度における人の視覚反応の最良の計測法である。日中、人の網膜の赤、緑、青色錐体は、400~700nmの光に反応する、つまりわれわ

れの明所視である。夜は、桿状体が微光に反応するが、範囲は400~600nmであり、人は暗所視になる。これは、色温度4100°K程度の月光の青みがかったスペクトルとよく一致している。視覚研究者が100年前から知っていたことは、2つのシステムが0.005~5カンデラ/m<sup>2</sup>の中間的光レベルでともに動作することである。また、今では薄明り領域の視覚反応を薄明視と言う。図3は、暗さへの適応の変動レベルに対する発光効率関数を示している。完全暗闇のm=0から昼の光をm=1に適用している。

北米照明学会 (IES) が設定した車道や駐車場の照明基準は以前から人の明順応反応をベースにしていた。そうした単純な基準は、高圧ナトリウムランプを含むほとんどの街路灯のスペクトルとよく一致していた。高圧ナトリウムランプは、相対的に高効率であり、白みがかったオレンジ色であり、CRI 85であることから、広く用いられている。

現在、米国エネルギー省 (DOE) は、そうしたランプをもっと高効率のLED電球と置き換えることを推進している。また、色温度が4000°Kかそれ以上のLEDランプを推奨している。理由は、一般に室内で普及している低い色温度のものよりも高効率であるからだ。色は月光のように見えるが、IES道路基準によって推奨されるレベルではそのLEDはランプの道路上での強度は、高圧ナトリウムランプと比べると遥かに明るく見える。

必要以上の明るさは薄明視ゾーンにおける目の反応によるものであり、これは高圧ナトリウムランプのオレンジがかった光と比べると、青みがかったLEDスペクトルに対する反応が著しく強い。照明コンサルタント、米クラントン&アソシエイツ社によってシアトルで行われたテストから、ナトリウムラン

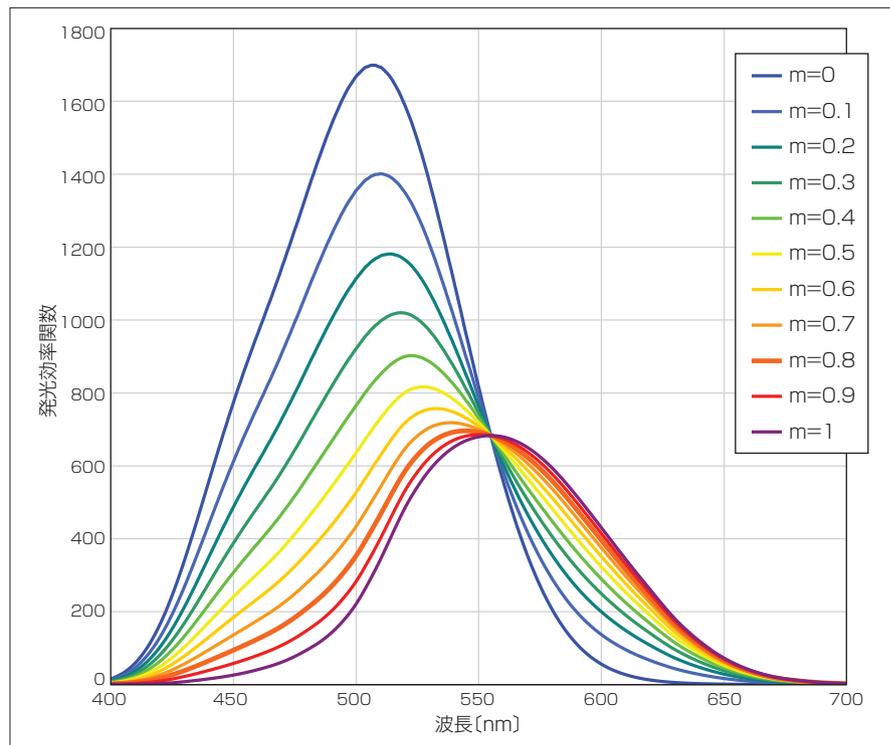


図3 薄明視では、眼の反応は完全に明順応した (m=1) の明所極致から完全に暗順応した時の明順応の極致 (m=0) まで変動する。目は、暗闇の中では青い光に対する感度ははるかに強いことは留意すべきである。青い光は、光のレベルが低いと明るく見える (テレサ・グッドマン氏提供 英国立物理学研究所)。

プと比べると、ドライバはLEDランプの領域で潜在的な危険を遥か手前から認識することが分かった。また、IES基準によって推奨されるレベルの半分にランプを調光しても危険検出距離は著しく短くならないことも分かった<sup>(4)</sup>。したがって、薄明視に基づいて新しい道路照明基準を採用すると、光のレベルを下げることで一層のエネルギーの節約が可能になる。これによって安全が損なわれることはなく、環境への影響も低減される。

## 展望

LED照明の色計測、基準、照度に対する影響について学ぶべきことはたくさんある。色は、非常に主観的であり、定量化が難しい。街路灯の環境への影響や安全運転に必要な照明などの問題は、さらに研究が必要である。また、トレードオフも慎重に研究する必要がある。とは言え、基準の見直しや慎重なマネージメントは、単にエネルギー効率を改善するだけでなく、固体照明のメリット拡大に役立てることができる。

## 参考文献

- (1) J. Jiao, "ANSI works to update the solid-state lighting standard for chromaticity," LEDs Magazine, 12, 2, 47 (Feb. 2015).
- (2) J. Jiao, "ANSI continues advancements on SSL chromaticity standard," LEDs Magazine, 12, 11, 41-43 (Nov. 2015).
- (3) M. Wright, "Lighting coalition asks EPA to lower Energy Star efficacy specs for high CRI lamps," LEDs Magazine online (Jan. 2013); <http://bit.ly/10At8IE>.
- (4) N. Clanton, "Seattle LED adaptive lighting study," Northwest Energy Efficiency Alliance (May 29, 2014); <http://bit.ly/10AtgYO>.