新しい演色性評価方法開発の最新動向
―― LED 照明を含む白色光源の演色性評価方法に向けた国際的検討 ――

渕　田　隆　義

Latest Trends in Development New Evaluation Method of Color Rendering Properties of White Light Source Including LED by International Commission on Illumination

Takayoshi FUCHIDA

Since the current CIE (International Commission on Illumination) color rendering specification can evaluate only fluorescence lamps according to the definition, it cannot evaluate LED light sources. Therefore, in CIE, the research and development of a new color-rendering valuation method which can also evaluate LED light sources have been advancing. A leading-edge trend is outlined.

Key words: color rendering properties, light sources, CIE

“照明”は現在，歴史的に約 60 年サイクルの変革期を迎えている（図 1）．白熱電球や蛍光ランプ，さらに大光量の HID ランプの領域にまで，新光源 LED 照明への移行が急速に進んでいる．その背景には，日本のみならず世界的にも地球温暖化防止のため省エネルギーが大命題になっていることがあり，現在，全電力消費のおよそ 10 数パーセントを占めている照明エネルギーを LED 照明化することで，電力消費を大幅に削減することが最大の使命になっている．

LED 光源の特徴は，省エネルギー，長寿命，小型・軽量，点光源，多様な光色，優れた点滅性能，割れない，可視光以外の放射がわずかである（紫外線，赤外線がほとんど出ていない），などがあげられ，これらの特徴を生かすことで，白熱電球や蛍光ランプなどの従来光源とは異なる多様な応用分野での発展が期待されている．

LED 照明は新しい光源であり，従来の白熱電球や蛍光ランプとは発光形態等が異なるため，白熱電球や蛍光ランプで定められてきた国際・国内規格，すなわち測定・評価方法，照明方法などがそのまま適用できない場合が発生し，LED 照明の性能を正しく定めることができない状況にある．そのため現在，公平かつ正確に測定できる測光技術や LED 照明の評価技術に関する国際標準を迅速に確立する国際的合意がなされ，その整備が進められている．国際標準化を図ることによって適切な照明環境を実現するためには，既存の光源や照明器具の規格化・標準化の流れ（図 2）が示すように，光源や点灯回路，照明器具など「ハード部分」の規格・標準化だけでなく，必要な照明要件を満たすために必要な光の測定・評価方法や光色，演色性，不快グレア，さらには住宅，オフィス，道路など分野ごとの照明基準など「ソフト部分」の規格・標準化がともに達成されなければならない．

1.　LED 照明の特徴

白色 LED 光源の発光の基本構造は，半導体素子である LED チップとそれを覆う蛍光体である（図 3）．現在主流の白色 LED ランプは，LED チップから発光した青色光のエネルギーの一部を蛍光体が吸収して黄色光に変換することにより，青色光と黄色光が混光した結果，白色光になる

女子美術大学大学院美術研究科芸術文化専攻（〒252–8538 相模原市南区麻溝台 1900）　E-mail: fuchida11001@venus.joshibi.jp

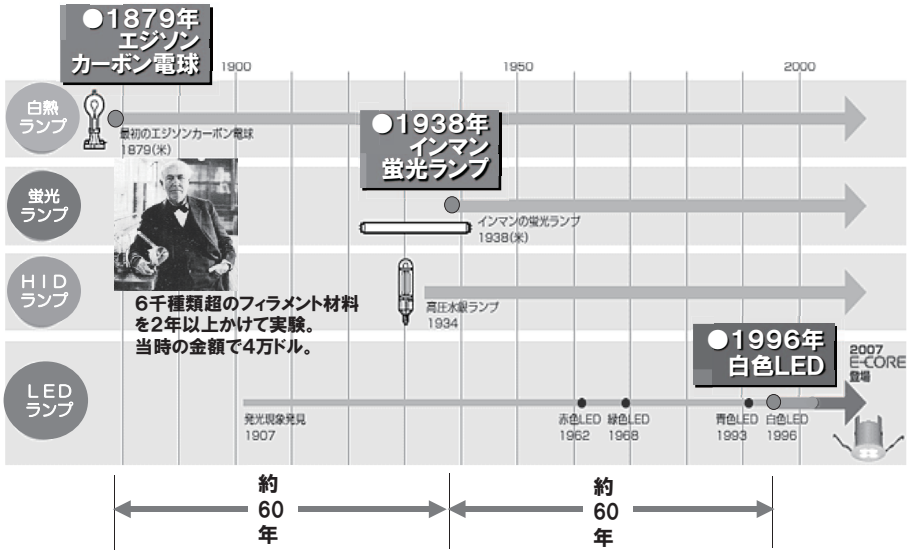

図 1　白熱電球から LED 光源まで.

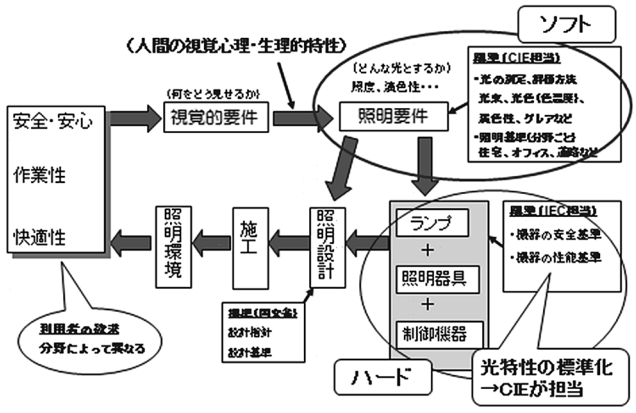

図 2　照明環境の実現のための評価サイクル.

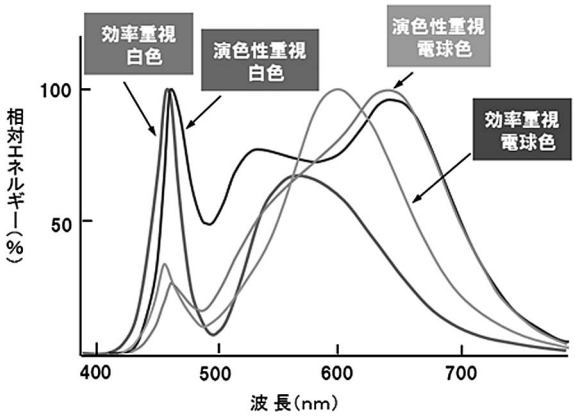

図 4　B-Y タイプの LED ランプの分光分布.

(B-Y タイプ，図 3 上).

白色 LED 光源には，青色 LED と黄色発光の蛍光体を組み合わせた構造のほかに，赤色（R），緑色（G），青色（B）に発光する LED チップを組み合わせ，R,G,B の光強度を適切に組み合わせることで白色光とするタイプ（RGB タイプ，図 3 中），近紫外線を発光する LED チップと赤色，緑色，青色に発光する蛍光体を組み合わせて白色光とするタイプ（UV-RGB タイプ，図 3 下）がある．現在，日本だけでなく世界で広く普及している LED 光源は一般的に B-Y タイプであり，それ以外はごく一部の特殊用途以外には用いられていない.

白色 LED 光源は半導体発光であり，従来の白熱電球や蛍光ランプとは分光分布が異なっている．図 4 に B-Y タイプの白色 LED 光源の分光分布の一例を示す．B-Y タイプの分光分布は，基本的に約 450～460 nm にピークをもつ山と約 570～600 nm にピークをもつ山からなっていて，前者の波長域が青色発光の LED の光であり，後者の波長域が黄色発光の蛍光体の光である．演色性が改善された LED ランプの分光分布は，B-Y タイプの白色 LED の光に不足している波長領域（多くの場合は赤色域）の光を発光する蛍光体を付加したタイプである.

既存光源で定められた標準では性能評価ができないもののひとつに，LED 照明の「演色性評価」がある．わが国を含めて現在世界的に利用されている CIE/JIS 演色性評価方法（CIE 2nd ed., 1974，JIS Z 8726-1990）は，そもそも蛍光ランプの演色性を評価するために開発されたものであり，現行方法で計算された LED 光源の演色評価数は，実際に感じられる照明の雰囲気とずれを生じる場合があるとの指摘もある.

現行の演色性評価方法を定める CIE 出版物 No.13.2-1974「演色性評価方法（第 2 版）」は，1983 年以降に何度か改正の議論が行われ，最近では 1996 年に日本が中心となって

表 1　CIE/JIS 演色性評価方法.

・忠実色再現に基づく相対演色評価方法	
・試験色を基準光（基準の光）と試験光で照明したときの演色による色刺激値のずれΔEiを計算　←von Kries係数法則による色順応補正	
・波長範囲	380 nm-5-780 nm （CIE 方法は 380-5-830）
・試験色	No. 1〜No. 8, No. 9〜No. 15 (CIE 方法は No. 14 まで)
・特殊演色評価数	$Ri = 100-4.6\Delta Ei$
・平均演色評価数	$Ra=\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} Ri$
・係数 4.6	1963 年当時の温白色 3000 K 一般形蛍光ランプ（ハロ燐酸カルシウム蛍光体）の Ra が 50（許容限界）となるように定めている
・基準光	試料光源　5000 K 未満→黒体放射 5000 K 以上→CIE 昼光 ただし，日本は蛍光ランプのみ　4600 K 以上→ CIE 昼光

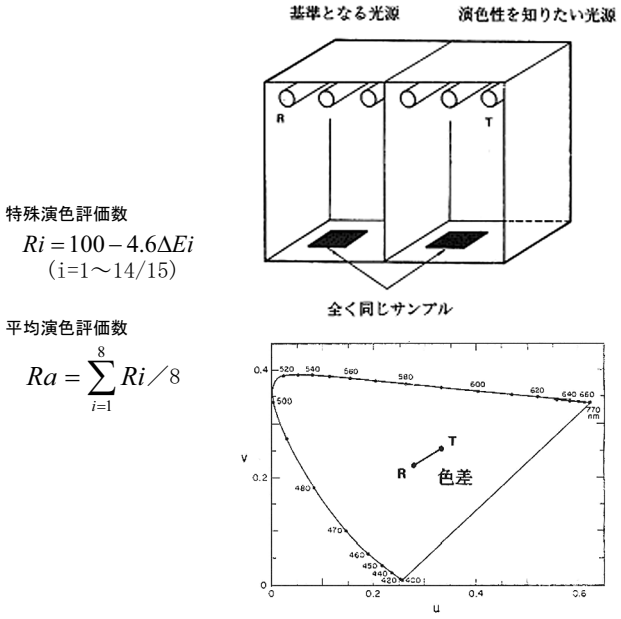

図 6　CIE/JIS 演色性評価方法の考え.

まとめた方法が提案されたが，CIE 第 2 版を置き換えるまでに至らなかった．CIE は，LED 照明の出現によって，2002 年に TC 1-62（白色 LED の演色性：P. Bodrogi 委員長）を設置し，その検討結果を受けて，2006 年に LED 照明を含めた光源の演色性を評価する新しい方法を開発するために技術委員会（TC 1-69：W. Davis 委員長）を新設し，現行方法を変更する CIE 第 3 版の検討を進めた．

また，LED 照明がもつ特徴的な“演色効果”をより積極的に評価する新しい評価方法の必要性についても CIE で議論され，2011 年 7 月の CIE 2011 南ア大会で新たに TC 1-87（New Aspects of Colour Rendering：M. Pointer 委員長）が設置され，色の好ましさ，色の調和，色の鮮やかさ・目立ち，自然らしさなど，人の感性に関わる複雑な感情要素を定量的に評価する方法の研究も着目され始めた．

2.　現行の CIE/JIS による光源の演色性評価方法

現在の CIE/JIS による光源の演色性評価方法の考え方を示す．わが国で用いられている方法（JIS Z8726-1990）は基本的に CIE による光源の演色性評価方法第 2 版と同じであり，「試験色方法による忠実色再現を数量化した相対演色性評価」とよばれる方法である（表 1）．

人がある光源の照明下で物の色を見たとき，それが良く見えるか悪く見えるかは，多くの場合何か基準になる光源で照明された色と比較して判断しているはずである．例えば，デパートで購入したセーターを自宅に持ち帰って，蛍光ランプで照明されたリビングで見たとき，こんな色ではなかった，ということが起こりうる．デパートの照明は昼光に近い光色で，演色性もかなり良い光源で照明されている場合が多い．それに対して自宅リビングがそれほど良くない演色性の電球色蛍光ランプで照明されている場合，セーター購入時の照明とは光色も演色性も異なる照明下で観察することになり，多くの場合，そこで色の違いを感じる．

演色評価数（Ra, Ri）の求め方は，演色評価数を知りたいテスト光源と，テスト光源の光色（相関色温度）と同じ光色をもつ基準光（CIE 昼光または完全放射体）の 2 つの光源で，特定の物体色（試験色という．図 5）を照明したときの物体色の測色値を計算で求める．テスト光源下の測色値と基準光下の測色値が全く同じであれば，色差が 0 であることから両者で照明された物体色の見え方が等しいことが予想され，その場合，演色評価数は 100 となる．逆に，テスト光源下の測色値と基準光下の測色値が等しくない場合，すなわち両者の色差が 0 でない場合は，演色評価数は 100 以下になる（図 6）．平均演色評価数（Ra）は，平均演色評価数計算用に定めた特定の 8 種類の試験色ごとに求めた演色評価数（特殊演色評価数）の総和を 8 で割った平均値である．

図 7 は LED ランプを含む各種光源の分光分布である．美術館・博物館用の蛍光ランプ（電球色）の分光分布（図 7 下）は白熱電球の分光分布とは完全には形状が等しくないが，蛍光ランプがもつ水銀可視輝線と蛍光体発光が良好にバランスして，白熱電球の分光分布とおおむね合致していることが明らかである．表 2 は図 7 に示すランプの演色評価数である．LED ランプでも高演色に設計された場合は，Ra の値が電球色タイプで 92，白色タイプで 96 のもの

表 2　各種光源の特性.

	FL-L-EDL *1	FL-N-EDL *2	LED *3 電球色	LED *4 白色	3 波長形 FL 電球色	FL-D65 *5	IL *6
色温度（K）	3000	5000	2800	4200	3000	6500	2800
平均演色評価数	95	99	92	96	88	99	100
R9	92	98	68	80	16	97	100
R15	97	99	88	91	96	98	100

*1 美術館・博物館用蛍光ランプ（電球色），*2 美術館・博物館用蛍光ランプ（昼白色），*3 LED ダウンライト E-CORE 演色性重視タイプ（白色相当），*4 LED ダウンライト E-CORE 演色性重視タイプ（電球色相当），*5 色評価用 D65 蛍光ランプ，*6 白熱電球.

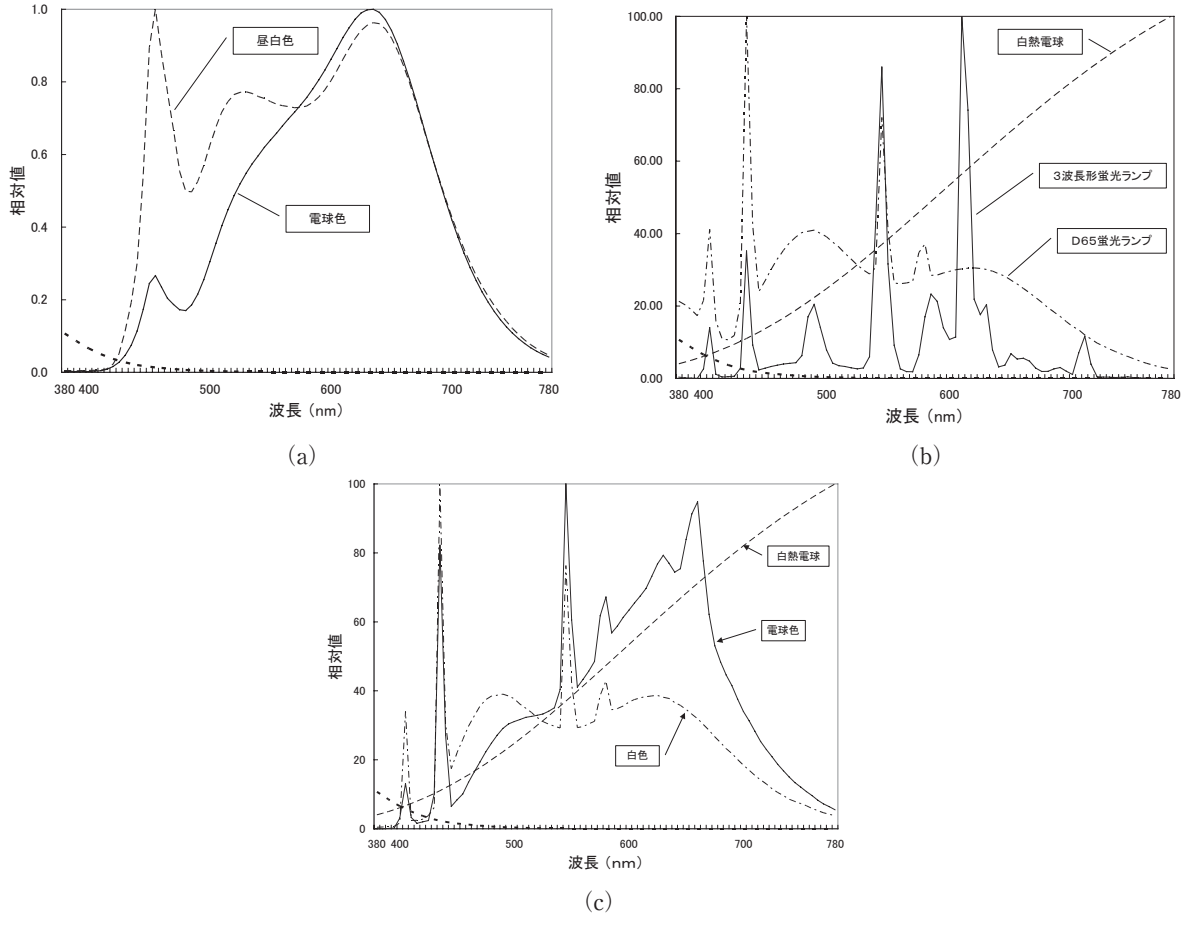

図 7　各種光源の分光分布.（a）LED ランプ（例），（b）3 波長形蛍光ランプ，（c）美術館・博物館用の蛍光ランプ.

も実現できる．特に高演色形の電球色 LED ランプの分光分布は，美術館・博物館用蛍光ランプの水銀可視輝線を除いた部分の形状ときわめて類似していることがわかる.

現在の CIE/JIS 演色性評価方法は，開発された当時の視覚・色彩科学知見の状況や考え方のシンプルさ，計算の簡便さなどを優先した結果，当初から次の① ～ ③ の問題点をもっている.

① 特殊演色評価数でマイナス値が出る．マイナス値の意味づけがわかりにくい.

② 知覚色のずれの方向についての情報を含まない．評価数が等しい光源でも等しい演色性をもつとは限らない.

③ 条件等色用の光源の評価には使えない.

また現在の CIE/JIS 演色性評価方法には，それを使用するにあたり，次の（a)～(d）に示すいくつかの前提と注意点があり，それらは規格書にも記載されている.

(a）演色評価数の目盛りは，試料光源と基準光で試験色を照明した場合，その差がわずかにわかる程度の色差

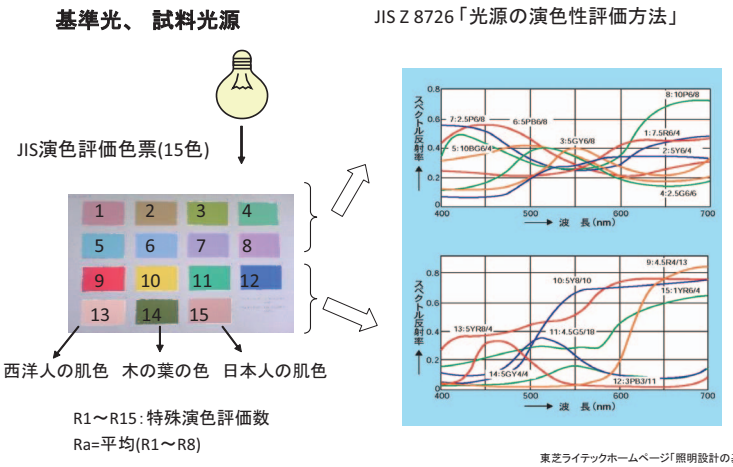

図 5　試験色方法.

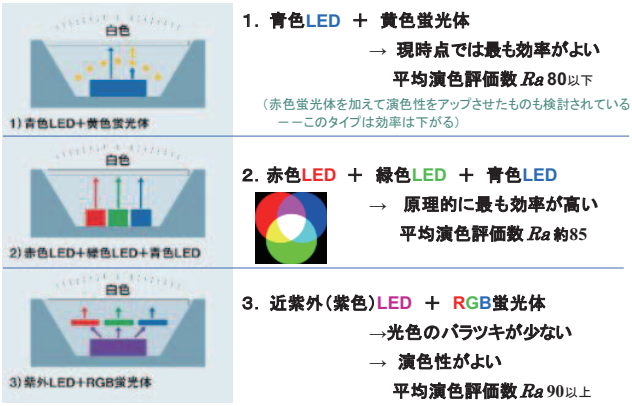

図 3　白色 LED の構造と特長.

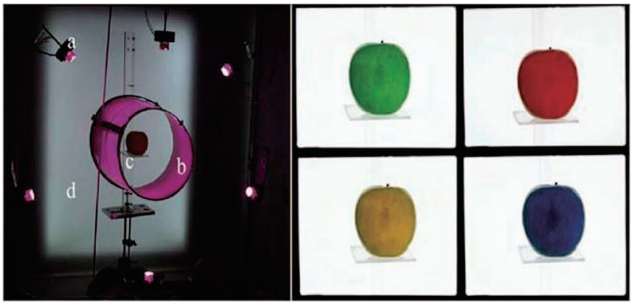

図 12　記憶色の実験.

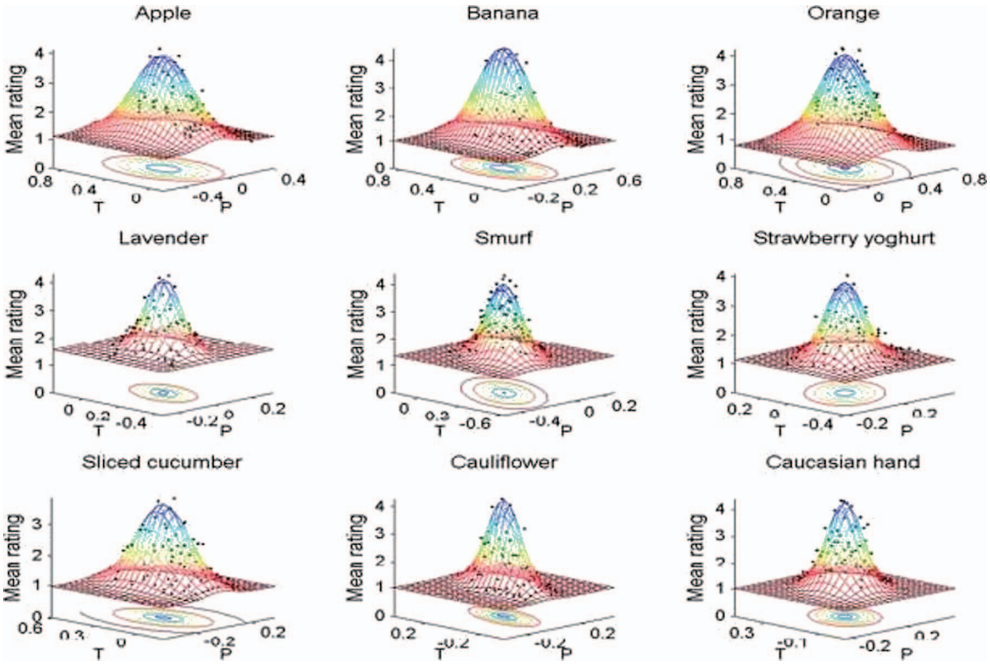

図 13　記憶色の実験結果.

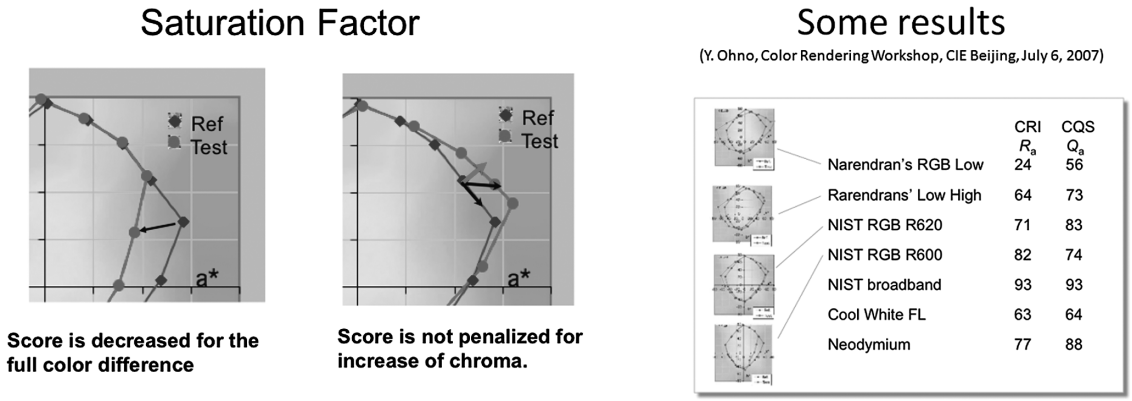

図 8　CQS の Saturation Factor（左）と計算例（右）.

が生じたとき，演色評価数が約 5 だけ小さくなるようになっている．したがって，演色評価数で 1〜2 程度以下の数値差を問題にすることは実用上意味がない．

（b）現行の演色性評価方法では，黒体軌跡，または CIE 昼光軌跡から離れた有彩色の光源の演色評価数を計算すると誤差が大きくなり，計算値は得られるがあまり意味がない．水銀ランプ，蛍光水銀ランプなどでは，その光色が黒体軌跡からややはずれているので正確な演色評価数は計算されない．

（c）相対演色性評価における基準光は，演色評価数を解釈する上で重要な情報を含んでおり，得られた演色評価数は基準光との相対関係を表わしているだけである．

（d）相関色温度 6500K（基準光 D6500K）で平均演色評価数 80 の光源と，相関色温度 3000K（基準光 P3000K）で平均演色評価数 80 の光源では，演色評価数が等しいというだけで，両光源照明下における物体色が等しく見えることを保証していない．

4.　新しい演色性評価方法の開発

CIE TC 1-69 の活動の中では，わが国からの提案である FCI（目立ち感指数），CCRI（カテゴリカル演色指数）を含め，いくつかの新しい演色性評価方法が提案されてきた．以下に，その中からおもなものをいくつか紹介する．

4. 1　CQS（Color Quality Index）

CQS は TC 1-69 委員長である W. Davis と Y. Ohno 氏から提案された評価方法である（実質的な開発者は Y. Ohno 氏）．

〈CQS の基本〉

・試験色　特別に選定した高彩度 15 色
・Saturation Factor
・色空間　CIELAB
・色順応補正　CMCCAT2000
・評価数　0〜100（マイナス値はなし）

CQS の大きな特徴は，ある光源で照明された物体色の色が基準光の照明下の色よりも低彩度にずれた場合は，現行の演色評価方法と同じく，その色ずれ（色差）をネガティブにとらえて減算の計算処理をするが，逆に基準光の照明下の色よりも高彩度にずれた場合は，色ずれをポジティブにとらえて減算しない，という Saturation Factor の考え方である（図 8）．ある光源で照明された物体色が高彩度にずれた場合，一般的には，物が鮮やかにくっきりと見えて，全体の雰囲気が好ましい照明と評価される．したがって，CQS は現行方法の基本的な考え方である忠実色再現とは異なる．

CQS が開発された背景は，特に赤色光，緑色光，青色光の三色で構成された RGB タイプの LED 光源で照明された場合に，物の色が好ましく照明され，照明空間全体も好ましく見えるのに，現行の演色性評価方法による *Ra* は低い値であり，正しく評価されていないという考え方である．

4. 2　nCRI（旧名称 CRI-CAM02UCS）

nCRI は Leeds 大学の R. Luo 氏らが提案したもので，基本的には現行の評価方法の試験色方法に基づく忠実色再現の方法を変えずに，色差計算のもととなる色空間と色順応補正式を置き換えるものである（図 9）．提案当初は CRI-CAM02UCS と称されていたが，その後，計算方法や用いる試験色の変更などが頻繁に行われるたびに名称も変更されてきた．2012 年 9 月まで nCRI と表示されていたが，最近では「CRI2012」と表記するようである．nCRI と現行 Ra, Ri との差異を図 10 に示す．

〈nCRI の基本〉

・色順応補正　CAMCAT02
・色差計算の色空間　CAM02UCS（R.Luo 氏らの提唱するモデルで CIE では標準化されていない）

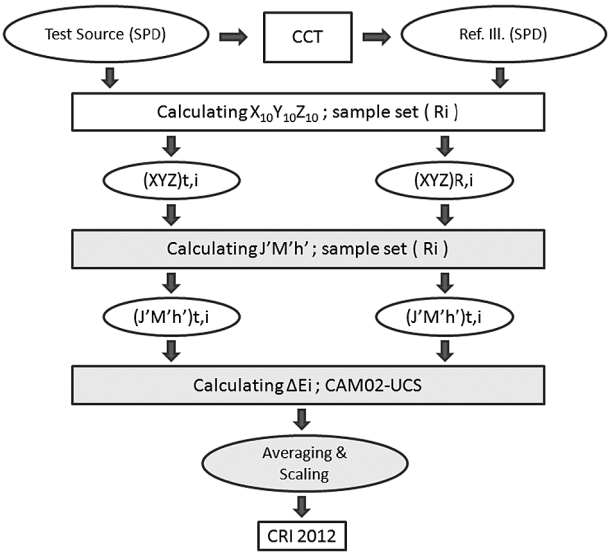

図 9　nCRI の計算の流れ.

	CRI	nCRI	備考
基準の光			相関色温度
三刺激値の計算	2度視野	10度視野	
色順応変換	Von-Kries	CAMCAT02	
色空間	CIE1964WUV	CAM02UCS	J', M'
試験色	14	17/180	180は偏色方向
演色評価数の計算	100 - 4.6 ΔEi	下式	式の変更あり

$$\Delta E\left(CAM02_UCS\right)=\left(\Delta J'^{2}+\Delta a_{M}'^{2}+\Delta b_{M}'^{2}\right)^{2}$$

$$nRa=400\left(1+exp\left(\frac{\left(\Delta EUCS\right)^{1.5}}{55}\right)\right)^{-2}$$

図 10　CRI と nCRI の違い.

・試験色　17 色 /180 色，最大 210 色

nCRI の最大の特徴は，R. Luo 氏らの提唱する CAM02 UCS 色空間を用いることにある．CAM02UCS は，提唱者 R. Luo 氏らによれば色の見えに関する多くの主観実験結果との相性がよいというが，CIECAM02 による色の見えに関する出力値の中から，カラフルネス／ブライトネスではなくカラフルネス／ライトネスの組み合わせを用いるなど，さらにモデルの検証が必要な点も多いと考えている．

4. 3　mCRI（Memory color index）

K. Smet が提案する熟知物（リンゴ，バナナなど）に対する記憶色に基づいた絶対演色評価方法である（図 11）．図 12 は K. Smet による熟知物の記憶色に関する主観評価実験の観察刺激の照明方法（図左）を示している．各熟知物に対して好ましいかどうか5段階評価した結果を図13に示す．主観結果と色度範囲（独自の反対色空間）をコーン状に表現した頂点を記憶色とみなし，それをターゲットにして，ある光源下の物体の色がそのターゲットの記憶色に合致すれば 100 点を与える考え方である．すなわち現行 CIE/JIS 方法や nCRI および CQS のように相関色温度が等しい基準光下の試験色との相対的関係を評価するのではなく，記憶色との絶対的関係を評価するもので，「絶対演色評価方法」のひとつである．図 14 は各種光源の *Ra* と mCRI の関係を示している．直線から大きく外れる，すなわち *Ra* と mCRI が異なる光源群がみられるが，その多くは LED ランプであるため，提案者の K. Smet は，現行 *Ra* では LED ランプの感性的な演色性を評価できないと指摘している．

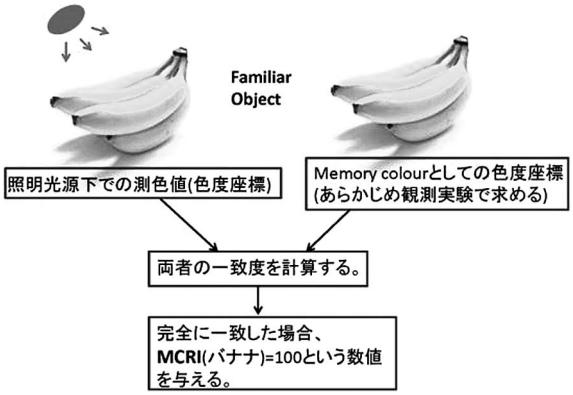

図 11　mCRI の考え方.

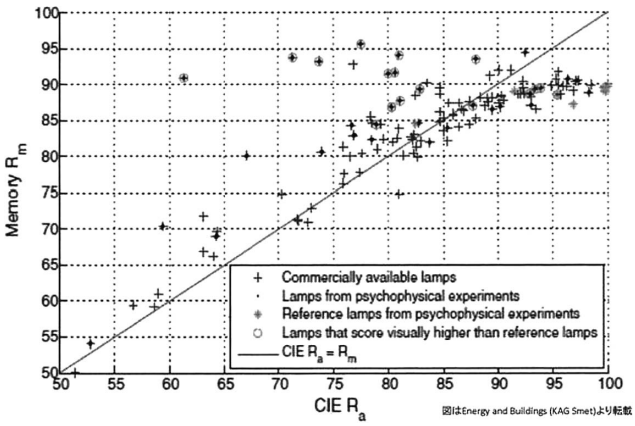

図 14　各種光源の mCRI と *Ra* の関係.

5.　CIE における新しい演色性評価方法開発のこれからの動き

2006 年に設置した TC 1-69 は現行の演色性評価方法に変わる新しい方法の開発に向けて検討してきたが，いくつかの大きな課題を解決することができず，結果的に新しい評価方法を決めることはあきらめ，技術報告書をまとめることに目標を変えた．TC 1-69 で解決できなかった課題は，新しい方法の候補として残った CQS と nCRI のそれぞれの

演色評価方法の基本的考え方が好ましさ評価と忠実色再現評価と大きく異なっていて，現行方法に変わる評価方法としてどちらも適切ではないと判断されたからである．TC 1-69 が新しい評価方法を拙速に決めずに最終的に技術報告書をまとめるだけにしたことに対しては，日本照明委員会（JCIE）に設置した TC 1-69 国内技術委員会の研究成果と，TC 1-69 に対する積極的な提案の成果が大きいと考えている．

今年 2012 年 9 月に台湾台北市で開催された CIE 第 1 部会において，TC 1-69 は技術報告書をまとめて終了することが決定され，新たに忠実色再現（colorimetric fidelity）に基づいた新しい演色性評価方法を 4 年以内に必ず提案することを活動方針とした新しい技術委員会 TC 1-90（委員会番号は未定）を設置することが決定された．新たに設置された TC 1-90 の委員長には，JCIE TC 1-69 国内技術委員会の主査（委員長）の矢口博久氏（千葉大学）が選出された．日本から TC 委員長を出すことになった背景には，TC 1-69 活動に対するこれまでの日本の中立的な活動成果が認められたこともあると思われる．また，第 1 部会では色の好ましさ，目立ち，自然らしさなど忠実色再現以外の演色性に関わる感性的な評価に基づいた新しい評価方法を調査検討する新しい技術委員会（TC 1-91）も設置し，Yandan Lee 氏（中国）を委員長にすることを決めた．TC 1-91 を新設したことにより，2011 年に新設した TC 1-87 は解散が決定された．

光源の演色性評価方法の開発は，歴史的には蛍光ランプが 1938 年に米国で開発・商品化されたことにより，1940 年代に始まり，1960 年代に CIE が現行方法とほぼ同じ CIE 演色性評価方法第 1 版をまとめた．CIE は第 1 版をまとめてからも継続的に研究を行い，評価方法の精緻化を図った第 2 版を 1970 年代にまとめている．さらに CIE は色の見えモデル（color appearance model）に基づいた評価方法の開発を目指した活動も精力的に行い，TC として新たな評価方法を提案する直前までいったが，最終段階で合意ができず TC を突然解散した経緯もある．

現行の CIE/JIS 演色性評価方法は，すでに CIE が廃止した色空間（1964$U^*V^*W^*$ 色空間）を特例でいまだに使い続けている，評価数がマイナス値となりその解釈が難しい，等々の欠陥をもっていることは明らかであり，いつかは改善しなければならない．今回，新たに TC 1-90 が設置され，4 年以内に必ず現行方法に代わる新しい評価方法を開発することになったことは，半世紀の演色性評価方法の歴史を塗り替える意義深いことと考えている．

（2012 年 11 月 19 日受理）