

シリーズ：著者が書く“論文活用マニュアル”〈第8回〉

## 「色彩の矛盾をひも解く」第4回 ファームゲート収縮とヘルムホルツ-コールラウシュ効果(後編)

Explaining Apparent Contradictions in Colors Part 4: Farm-Gate Contraction and Helmholtz-Kohlrausch effect. Part II.

酒井 英樹 Hideki Sakai

大阪市立大学大学院生活科学研究科

Graduate School of Human Life Science, Osaka City University

### 1. はじめに(前回<sup>1)</sup>のつづき)

前回にひきつづき、ヘルムホルツ-コールラウシュ効果(H-K効果)を詳しく見ていきましょう。その定義は、「明所視の範囲内で輝度を一定に保ちながら、色刺激の純度を増加させたときに知覚色の明るさが変化する現象<sup>2)</sup>」というものでした。物体色にあてはめれば、「明所視の範囲内で(同一照度で)視感反射率を一定に保ちながら、彩度を増加させたときに知覚明度が変化する現象」と言えるでしょうか。いずれにしても、色の純度や彩度が高くなると、輝度や視感反射率から予測される明るさが実際の知覚と一致しないということです。では、高純度・高彩度色の明るさ、知覚明度を表すことができない輝度や視感反射率は、一体どうやって決められたのでしょうか。なぜ一致するように決めなかったのでしょうか。ここに現在の測光・測色体系の欠陥ともいえる大きな矛盾があります。

### 2. 現行の測光・測色体系の矛盾

この問題の出所ははっきりしていて、輝度及び視感反射率を計算する際に使われる分光視感効率に起因します。図1に、1924年に国際照明委員会によって定められた2度視野、明所視における標準分光視感効率(spectral luminance efficiency, 記号 $V(\lambda)$ )<sup>3)</sup>を示しま

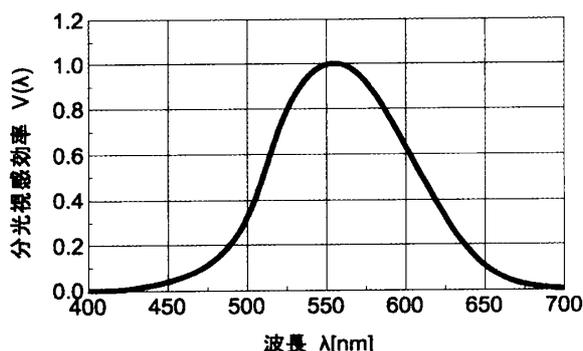


図1 明所視の標準分光視感効率(2度視野の場合)

す。図を見ると、例えば555nmの単色光(緑)に対する感度1に対して、650nmの光(赤)に対する感度はおよそ0.1ですので、650nmの単色光を555nmの単色光と同じ輝度にするには約10倍の光エネルギーが必要であることがわかります。では、このようにして同じ輝度になった赤と緑の単色光が果たして同じ明るさに知覚されるかということ、残念ながらそうではないというのが、H-K効果と呼ばれている現象です。前回紹介した作り話で、始めからピタゴラスの定理を使っていれば、ファームゲート収縮という効果を持ち出す必要がなかったのと同じで、知覚される明るさをきちんと予測できる分光視感効率を作っていれば、H-K効果は存在しなかったことになります。

なぜ、このようなことになっているかということ、分光視感効率を決める際、赤や緑などの単色光の明るさを直接比較すると、前回紹介したように個人差が非常に大きく、評価が難しかったことから、フリッカー法と呼ばれる2つの色を高速で交互に照らして、色を混色した状態で等明るさの条件を評価したためです<sup>4, 5)</sup>。混色した状態であっても、成分となった2つの色に明るさの違いがあるとちらつき(フリッカー)が残ることから、ちらつきを感じなくなるように2色の強度を調整することで、等明るさとなる光エネルギー比を決定することができます。混色することで色刺激の純度が低下した状態で評価でき、評価結果に個人差が出にくいことから、このフリッカー法によって求めた分光感度が標準分光視感効率として1924年に採用されました。これにより、現在でもまだ完全には解明されていない高純度色に対する明るさ評価の個人差(H-K効果の個人差)の研究を待つことなく、いち早く測光・測色体系を制定することができ、その後、色彩学は目覚ましい発展を遂げることができました。ただし、高純度の状態での色の明るさを直接評価していないフリッカー

法を採用した代償として、輝度と知覚される明るさが高純度色では一致しないことになりました。

さらに、表色系における明度スケールの決め方にも問題がありました。例えば、マンセル明度は、白から黒までの無彩色列が知覚的に等歩度になるように上述の分光視感効率とは無関係な視感評価実験に基づいて決められました<sup>4)</sup>。ところが、有彩色の明度スケールは、視感評価実験からではなく、図1の標準分光視感効率を使って一旦、視感反射率を計算し、その視感反射率と同じ値をもつ無彩色の明度をもって、有彩色の明度と定義されました。つまり、5R 4/14のマンセル明度は、その鮮やかな高彩度の赤を見て決めたのではなく、その視感反射率が11.7%であり、無彩色のN4の視感反射率11.7%と同じだから明度4としているに過ぎません。彩度0の無彩色に対して決めた明度スケールを、有彩色に対して適用することは実験結果の外挿にあたり、一致する保証は全くありません。また、実際のところ、前回紹介したように、5R 4/14の明るさを直接評価すると、N6.01相当の明るさであった(国際照明委員会の技術報告<sup>6)</sup>)というわけです。

知覚される色を表示するのが表色系の目的だとすれば、本来、5R 4/14に相当する色の明るさを直接評価すべきであって、それをしていないのは、測光・測色体系の欠陥と言えます。しかし、輝度にしてもマンセル明度にしても、個人差が少なく再現性が高いという基準、規格にとって必要とされる要件を満たすことを優先して定義したことにより、色を定量的に取り扱うことが可能となり、そのおかげで、高純度・高彩度色の明るさ、知覚明度もH-K効果という形ではありますが、研究が進むことになりました。

いずれにしても、同じマンセル明度の色票を見比べる際、色相や彩度によっては同じ明るさを感じないのはむしろ自然なことであり、それは、錯視ではなく、基準がズレているのです。

さらに、日常生活において、カラーデザインを鑑賞する際、我々はフリッカー法などは用いず、その色の鮮やかさ、明るさを直接見て感じている、つまりH-K効果込みで色を評価しているわけですので、H-K効果を含んだ色の知覚を表現することが、理想的な測光・測色体系の最終目標となると考えられます。

### 3. 理想的な測光・測色体系を目指して

では、H-K効果を含んだ純粋な色知覚に基づく色体系は、どうやったら作れるのでしょうか？1つには、有彩色の鮮やかさや明るさを直接評価し、分光視感効

率やマンセル明度に頼らずに、何もない空間に1から色のスケールをつくることです。これを実施するには、膨大な手間と時間、多くの熟練した被験者の協力が欠かせませんが、これに該当するものに、1950年代に開発され1964年に発表された日本色彩研究所のPCCS、1964年から開発がはじまり1978年に発表されたスウェーデンのNCSなどがあります。

もう1つの方法としては、1つの実験に頼ると大きな誤差が生じることから、これまでに報告されたさまざまな色覚現象をH-K効果と理論的に結びつけることで、より強固で信頼性の高い理論モデル(究極にはピタゴラスの定理に相当するようなもの)を作り上げることです。Nayatani-Theoretical 表色系(以下、NT表色系)<sup>7)</sup>は、それを目指したものです。NT表色系は、Evansの提案した色彩強度という概念<sup>8)</sup>が、H-K効果を含む明度属性だけでなく、彩度や色相変化にも共通することを見いだしたNayataniが、理論的な考察に基づいて現在までに報告されているさまざまな色覚実験結果に基づき作成した表色系で、そのNT明度は、H-K効果を含んだものになっています。

PCCS、NCS、NT表色系の3者の目指すところ(理想的な測色体系)は同じで、とくにPCCSとNT表色系は、作成過程が全く異なるにも関わらず、ほぼ同様の色空間になっていることが、NayataniとKomatsubaraの研究<sup>9)</sup>で判明しています。

### 参考文献

- 1) 酒井英樹, 「色彩の矛盾をひも解く」第3回, 日本色彩学会誌 Vol.36, No.4, pp.303-305 (2012)
- 2) JIS Z8105: 2000 「色に関する用語」日本規格協会
- 3) JIS Z8781-1: 2012 「測色 - 第1部: CIE測色標準観測者の等色関数」日本規格協会
- 4) G.Wyszecki, W.S.Stiles, Color Science, 2nd ed., Wiley (1982)
- 5) 太田登, 色彩工学第2版, 東京電機大学(2001)
- 6) CIE 141-2001 Testing of Supplementary Systems of Photometry, CIE Central Bureau (2001)
- 7) 酒井英樹, Nayatani-Theoretical表色系とトーン概念, 日本色彩学会誌 Vol.35, No.1, pp.31-34 (2011)
- 8) 酒井英樹, 「色彩の矛盾をひも解く」第2回, 日本色彩学会誌 Vol.36, No.3, pp.240-243 (2012)
- 9) Y.Nayatani, H.Komatsubara, Relationships among Chromatic Tone, Perceived Lightness, and Degree of Vividness, Color Research and Application Vol.30, pp.221-234 (2005)