焦　点

光とダイバーシティ

千葉大学 名誉教授
矢口博久　YAGUCHI, Hirohisa
（当協会　光応用技術研修会，色彩工学講座　講師）

私は長い間，光や色の国際標準を勧告する機関である国際照明委員会（CIE）に関わってきた。光の量を扱うには放射量に人間の明るさに対する分光感度の重みを掛けた値，いわゆる測光単位を使う。この標準的な明るさの分光感度は CIE が 1924 年に定めたもので，標準分光視感効率関数 CIE $V(\lambda)$ と呼ばれている。年配の方には比視感度と言った方が馴染みあるかも知れない。また，色に関わる仕事をされている方には色を数値化する CIE 三刺激値 XYZ にも馴染みがあると思う。色を表す単位の測色値は人間の感覚量であることはよく知られているが，ここで重要なのは光の単位にも人間の感覚が取り入れられているということである。

そもそも $V(\lambda)$とはどのように作られたのか？分光視感効率関数とは人間の光に対する分光感度である。その測定には人間の可視域である約 400nm から 700nm までの単色光の明るさを一定の明るさの参照光（一般には白色光）に合わせる視覚実験を行う。この方法には大きく 2 つがある。白色光と単色光を 2 つの視野に空間的に並べて，その明るさを比較する直接比較法と，2 つの光を同一視野に時間的に交互に提示し，そのちらつき感（フリッカー）を最小にする交照法である。直接比較法では色が異なる光の明るさを比較するので，難しく，また個人差も大きくなる。一方，交照法では色の違いによるフリッカーは感じられず，光のフリッカーだけに集中して判断できるので，容易で，個人差も直接比較法に比べ少ない。いずれにしても，明るさマッチングあるいは最小フリッカーの時の単色光の放射量の逆数を波長の関数で表したものが分光視感効率関数である。CIE は 265 人の実験データを基に $V(\lambda)$を定めた。約半数以上は交照法によるもので，部分的に直接比較法のデータが採用されている。これらのデータには個人差が大きく，単なる平均ではなく，工夫してスムーズな曲線を作り出した。図 1 の実線が CIE $V(\lambda)$である。では，この曲線の形を作り出す生理学的なメカニズムはどのようなものなのか？また，個人差はどこから生じるのだろうか？ヒトの眼の光センサーは網膜にある錐体細胞である。錐体の外節にある色素（視物質）が光を吸収し，その吸収量に応じて信号を脳に伝え，明るさを感じる視覚反応となる。したがって，錐体視物質の分光吸収率がこの形状を決める第 1 のものとなる。ヒトの網膜には約 600 万の錐体細胞がある。錐体は網膜中心部ほど密度が高く，特に 2°視野付近の中心窩に密集している。この付近は錐体の間隔は視角で約 30 秒であり，視力に換算すると 2.0 となる。したがって，我々は何かを見る時は眼球を動かして，見たいものを中心窩で捉える。また，錐体にはその視物質の分光吸収の違いから 3 種類があり，それが色覚をもたらしている。いわゆるヤング・ヘルムホルツの 3 色理論である。分光吸収率のピーク波長の長いほうから，L 錐体，M 錐体，S 錐体と呼ばれる。S 錐体は分布密度が低く，錐体全体の約 1/60 といわれている。中心窩部分はほとんど L 錐体と M 錐体で覆われているといっても過言ではない。ものの形状の細かい部分を見る時は L 錐体と M 錐体でサンプリングすることになり，S 錐体は関与しない。$V(\lambda)$の基になった交照法も同様で，L 錐体と M 錐体が関与し，S 錐体は介入しないとされている。今では補償光学の技術を使って，生きた人間の網膜における錐体の分布の様子を撮影できるようになった。それによると，

L 錐体，M 錐体の分布には大きな個人差があることが分かった。平均すると L:M は約 2:1 とされている。したがって，錐体密度分布も個人差の要因となる。また，錐体視物質にも個人差がある。L 錐体と M 錐体は進化的には最近分岐したものであり，その分光感度のピーク波長も約 30nm しか離れていない。さらに L 錐体の分光感度のピーク波長が M 錐体に近づいている 1 型 3 色覚や，M 錐体が L 錐体に近づいている 2 型 3 色覚がある。また，L 錐体あるいは M 錐体を持たない，それぞれ 1 型 2 色覚，2 型 2 色覚もある。男性の約 5%はこれらの範疇に入る。5%という数字はもはや異常とするには大きな出現頻度であり，ここでは色覚異常という用語は使わない。要は，色覚は多様であり，分光視感効率も錐体分光感度が基になっているので，多様性を持つということである。さらに，分光視感効率を算出する際の放射量は眼に入る前で測定されるので，実際は角膜から眼に入り，錐体に到達するまでには，水晶体，網膜中心窩表面の黄斑色素などの吸収を受けることになる。したがって，水晶体，黄斑色素の分光濃度も分光視感効率の形状を決める要因となる。特に水晶体は加齢により短波長の吸収率が高くなり，黄濁していく。したがって，分光視感効率も短波長域で徐々に低下していく。このようにして，分光視感効率はさらに多様性を増していく。測光量の単位の一つである輝度は物体やディスプレイなど画像の明るさを表す単位として用いられる。分光視感効率の多様性から言えることは，同じ輝度でも人によってその明るさは異なって感じられるということである。特に異なる色の輝度ではその傾向は顕著であるが，同じ色度を持つ分光放射分布の異なる色光（メタマーと呼ばれる）でも人によっては異なった色，明るさに見えることがある。

さて，CIE $V(\lambda)$が制定されたのは 1924 年で，3 年後には 100 周年となる。しかし，制定その後の分光視感効率の多くの測定結果は短波長域で CIEV(λ)より高い感度を示すことが言われてきた。何度かの修正の試みもあったが，測光量の値が変わることはあまりにも大きな影響があることや，明るさの加法則などの他の問題もあり，今日まで改訂されることはなかった。このような中，より人間の感覚に忠実な測光，表色系の改良も行われ，CIE では 2006 年に人間の標準的な錐体の分光感度（錐体基本関数）が制定され，2015 年には錐体基本関数に基づく分光視感効率関数 $V_F(\lambda)$，さらに $X_FY_FZ_F$ 表色系も発表された。図 1 の波線がこの $V_F(\lambda)$である。CIE $V(\lambda)$より短波長域で感度が高くなっている。$V_F(\lambda)$を使うと，青い光はこれまでより明るく評価されることになる。SI 単位（国際単位）には測光量の光度が入っているが，その定義は「カンデラ cd は光度の単位であり，周波数 540THz の単色光の単色放射の視感効率度を 683 lm/W と定める」と物理的な表現になっている。周波数 540THz の単色光は CIE $V(\lambda)$のピーク波長 555 nm に相当する。つまり，光度は厳密には 555 nm だけに定義されており，その他の白色光などの複合放射については，冒頭で述べたように $V(\lambda)$の重みをかけて計算される。そこで，$V(\lambda)$の代わりに，$V_F(\lambda)$でディスプレイの白色として用いられている CIE 昼光の D65 の測光値を計算してみると，約 5%の明るい評価値が得られる。言い換えれば，（あくまでも評価値の取り方の問題であるが，）今までより 5%少ないエネルギーで同じ明るさの光を得ることができることにある。しかし，注意して頂きたいのは，$V_F(\lambda)$の使用はあくまでも補助的であり，これからも測光量の定義は CIE $V(\lambda)$を使うことに変わりない。状況に応じて，視覚の多様性を考えて光の単位を扱うことによって，問題解決や新たな発見もあるかも知れない。

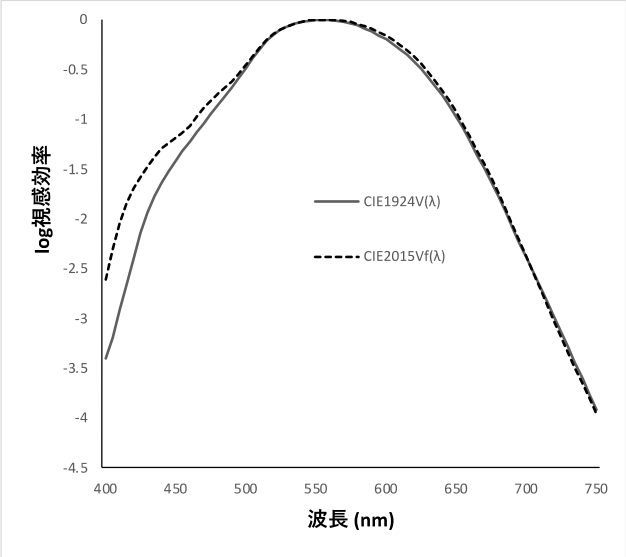

図 1　CIE の分光視感効率関数