

シリーズ解説 表色系 第2回

“光を測る”

Measurement of Light — Photometry

小林光夫 KOBAYASI, Mituo 電気通信大学 The University of Electro-Communications

CIEXYZ表色系に代表される心理物理レベルの表色系では、色光の混合量と人間の色感覚との関係に基づき、表色値を定めます。この表色法は、別の見方をすれば、目に入る光を物理的に測り、その結果をもとに色を定める方法とも言えます。この“光を測って色を知る”方法を理解するには、まず光の測り方を知ることが必要です。今回は、光を測ること—測光(photometry)—に関して、大事ないくつかの概念を述べます。

1. 光の分光分布と放射量の計算

光とは、目に見える電磁波のことをいいます。波長がおよそ380nm~780nmの電磁波は目に見えるとされています。目に見える波長の範囲のことを可視波長範囲と呼び、物体から放出され空間を伝わる電磁波のことを放射 (radiation) と呼ぶので、光とは、“波長が可視波長範囲にある放射”ともいえます。

さて、光には青い光や赤い光というように、いろいろな種類のものがありますが、これらの違いは、波長ごとに放射の強さあるいはエネルギーが異なることにより生じます。すなわち、放射の強さは、波長により異なりうるのです。どの波長の放射がどのくらいの強さであるかを、放射の分光分布(spectral distribution)と呼びます。したがって、光あるいは放射は、その分光分布によって特徴づけられるわけです。“分光”とは、波長ごとに光を分けるという意味であり、英語では“スペクトル(spectrum)”という語に当たります。

図1は、ある放射の分光分布の測定値を表わすグラフです。グラフの横軸は波長を表わします。縦軸は、小波長幅内の放射エネルギー量をその波長幅で割った値、すなわちエネルギー密度(単位波長あたりのエネルギー量)を表わしています。ただし、縦軸のエネルギー密度の数値は、ある基準値に対する

相対値です。

照明や色彩の分野では、放射の分光分布といえ、このように、波長に対するエネルギー密度すなわち分光エネルギー密度のことを指しています。

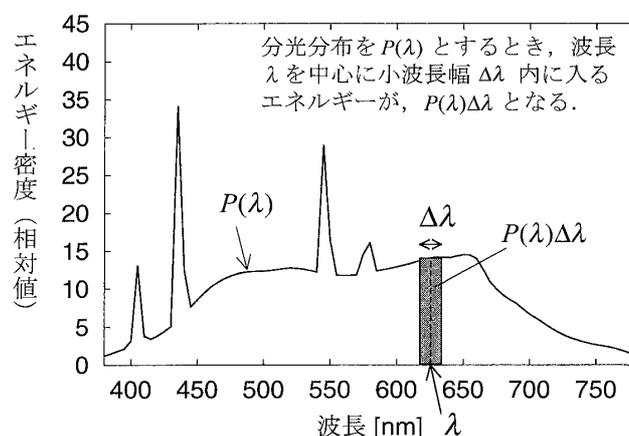


図1 ある放射の分光分布

図2は、図1の分光分布において、380nmから780nmまでの5nmおきの各波長を中心、エネルギー密度を高さとし、波長幅5nmを底辺とする小長方形を描いたものです。各長方形の面積(エネルギー密度×波長幅)が、波長幅内のエネルギーを表わしますが、すべての小長方形の面積の総和が、この放射のもつ(可視波長範囲における)全エネルギーを表わします。波長幅は、精密に測るときは5nmかそれ以下、多少誤差を含んでもよいときは10nm、20nmなどとします。

放射のもつエネルギーのことを、総称して放射量 (radiant quantity) といいます。以上で、分光分布が与えられたときの放射量の計算法がわかったかと思えます。

ところで、図1のグラフを見ると、波長405nm、435nm、545nm、575nmのあたりに鋭い突起がみられます。これは、放射エネルギーがその波長のあ

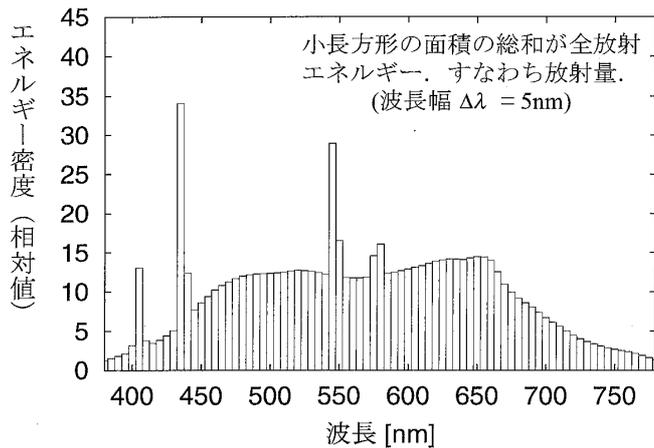


図2 分光分布と放射量との関係

たりに集中して存在することを表わしています。このように、ある波長だけにエネルギーが集中して存在する場合は、輝線スペクトルと呼ばれます。輝線スペクトル以外の場合は、波長に対しエネルギー密度が連続的に変化しているので、連続スペクトルと呼ばれます。とくに、一つの輝線スペクトルだけからなる光は、単色光(monochromatic light)と呼ばれ、明るさや色に関する心理物理量を定める上で重要な役割をはたします。

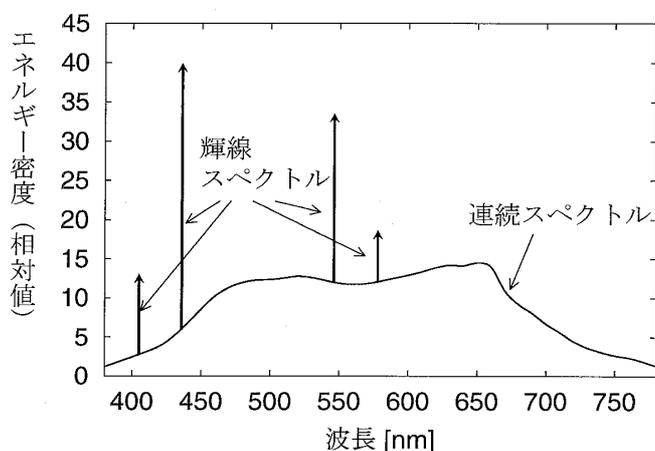


図3 連続スペクトルと輝線スペクトル

[連続スペクトルと輝線スペクトルの性質]

連続スペクトルでは、波長幅を小さくするとその波長幅内のエネルギー量は波長幅に比例して小さくなります。一方、輝線スペクトルでは、波長幅内のエネルギー量は波長幅に無関係に一定なので、波長幅を小さくしていくとエネルギー密度は無限に大きくなってしまいます(図3参照)。すなわち、輝線スペクトルに対しては、エネルギー密度を考慮することができないのです。ただし、可視波長範囲を小波長幅で分割し、放射エネルギーを計算する場合は、波長

幅を無限に小さくするわけではありませんので、心配無用です。

2. 分光視感効率

光は、人間に明るさ感覚を与えます。強い光は明るく、弱い光は暗く感じます。では、明るさ感覚は光のエネルギー量だけによるかということ、そうではありません。たとえば、可視波長範囲外の放射は、いくらエネルギーをもっていても見えません。すなわち明るさ感覚を与えません。可視波長範囲内の放射でも、波長によって明るさ感覚は異なります。CIE(国際照明委員会)は、ある特定の視環境のもとで、同じ明るさに感じる単色光の放射量と波長の関係を調べた結果、放射量を明るさ感覚へ変換する際の効率ともいべき、分光視感効率(spectral luminous efficiency, 比視感度ということもある)を定めました。図4に、明るいところで物を見たとき(明所視)の分光視感効率のグラフを示します。暗いところで物を見たとき(暗所視)の分光視感効率も定められていますが、暗所では色が見えませんが、ここでは省略します。明所視の分光視感効率は、波長 λ の関数として、 $V(\lambda)$ と書かれます。

このグラフは、まず、同じエネルギーの単色光に対し、最も明るく感じる波長は555nmであることを示しています。そして、たとえば、波長500nmでは分光視感効率は0.323ですが、これは、500nmの単色光は555nmの単色光と比べると、明るさを感じさせる力が0.323=約1/3程度しかないことを表わしています。別の見方をすれば、500nmの単色光は、555nmの光と同じ明るさ感覚を与えるためには、 $1/0.323=約3$ 倍のエネルギーをもつ必要があることを示しています。一般に波長 λ の単色光は、555nmの単色光と同じ明るさ感覚を与えるのに、555nmの光のエネルギーの $1/V(\lambda)$ のエネルギーを必要とします。

分光視感効率は、明るさ感覚そのものを表わす量ではないことに注意する必要があります。たとえば、500nmの分光視感効率が0.323であるからといって、500nmの単色光が、同じエネルギーの555nmの単色光の0.323倍の明るさ感覚をもたらすわけではありません。

分光視感効率とは、単色光の放射量のうち、どのくらいの量が明るさ感覚に寄与するかを、もっとも寄与率の高い555nmの単色光を基準として測ったも

のといえます。

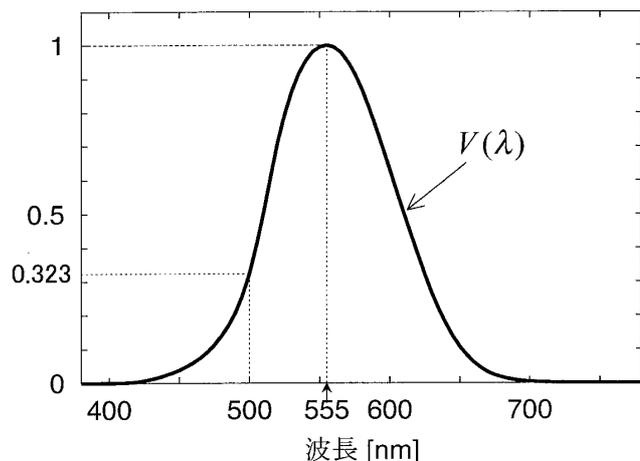


図4 明所視の分光視感効率 $V(\lambda)$

[分布と比率の違い]

分光視感効率は、分光分布と同じように波長に対するグラフで表わされますが、“分布”ではありません。分布とは、ものがどこにどれだけあるか、すなわち各所における存在量を表わす概念です。分光視感効率のように比率を表わす量は、分布とは異なる概念です。

このことは、たとえば、比率どうしは掛け算ができるが、分布どうしの掛け算などは考えられないことから、わかるでしょう。また、分布は、一般に単位をもつ量ですが、比率は単位をもたない量(無次元量)です。このことから、両者が違う概念であることがわかります。

3. 測光量の計算

放射量のうち明るさ感覚に寄与する量を測光量 (luminous quantity) と呼びます。測光量とは、“明るさをもつ光として測定される量” といった意味です。

ここで、任意の分光分布をもつ放射の、測光量の計算法を考えてみましょう。

図5を見て下さい。一番左のグラフは、与えられた放射の分光分布を表わします。たとえば、波長500nmを中心に、波長幅20nmの小範囲を考えると、この波長幅内の放射エネルギーは、 $12.4 \times 20 (=248)$ 単位ということになります。この波長における分光視感効率、すなわち1単位のエネルギーが明るさ感覚に寄与する分は0.323ですから、 12.4×20 単位のエネルギー量が明るさ感覚に寄与する分は、 $0.323 \times 12.4 \times 20 (=80.104)$ 単位ということになります。

このような計算を、波長380nmから780nmまで20nmおきに行い、総和をとると、可視波長範囲内の全放射エネルギーのうち明るさ感覚に寄与する量、すなわち測光量が計算できます。計算の過程を表1に示します。

測光量は、明るさ感覚に比例するわけではありませんが、測光量の大小は明るさ感覚の大小に対応しますので、明るさを議論する際の基本量として、よく使われます。

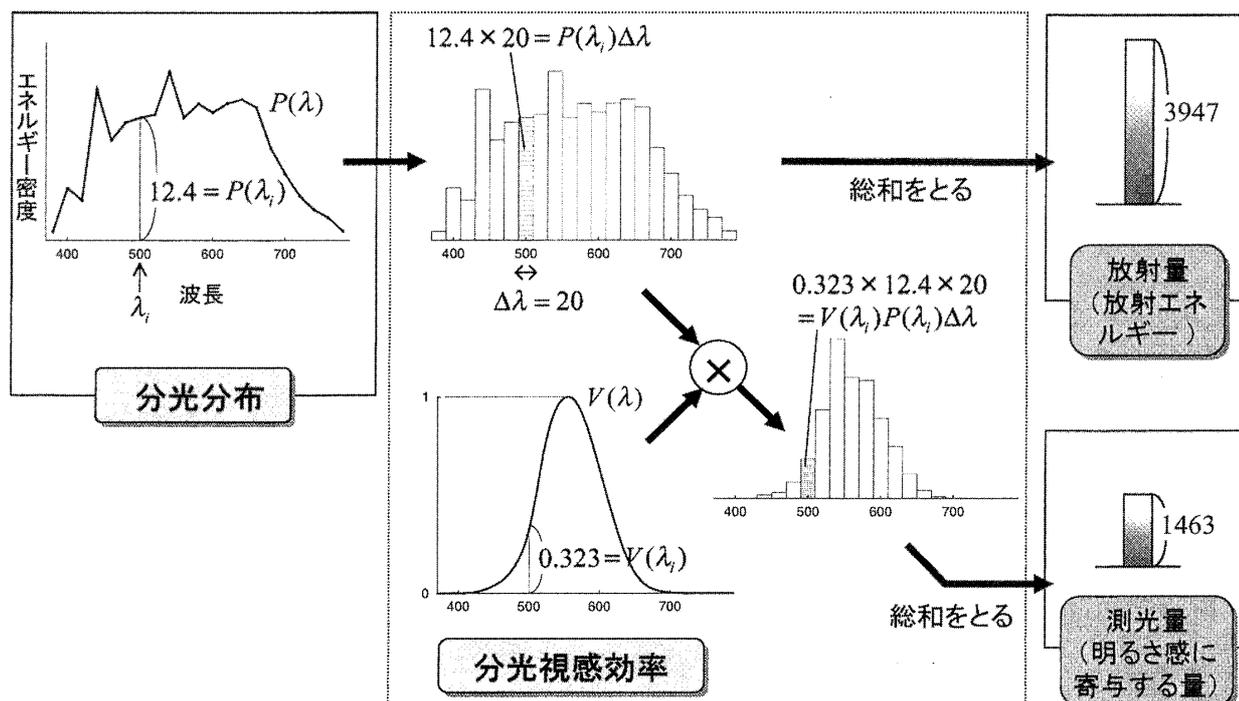


図5 測光量の計算

表1 放射量と測光量の計算例

i	波長 λ_i	(a) 分光分布 $P(\lambda_i)$	(b) (a) と波長幅 $\Delta\lambda$ の積 $P(\lambda_i)\Delta\lambda$	(c) 分光視感効率 $V(\lambda_i)$	(d) (b) と (c) の積 $V(\lambda_i)P(\lambda_i)\Delta\lambda$
1	380	0.90	18.08	0.000039	0.00
2	400	5.30	106.00	0.000396	0.04
3	420	4.05	80.95	0.004000	0.32
4	440	15.26	305.23	0.023000	7.02
5	460	10.13	202.53	0.060000	12.15
6	480	11.92	238.32	0.139020	33.13
7	500	12.38	247.62	0.323000	79.98
8	520	12.69	253.72	0.710000	180.14
9	540	17.04	340.83	0.954000	325.15
10	560	12.37	247.47	0.995000	246.23
11	580	13.81	276.22	0.870000	240.31
12	600	12.92	258.48	0.631000	163.10
13	620	13.83	276.60	0.381000	105.38
14	640	14.24	284.90	0.175000	49.86
15	660	13.45	268.92	0.061000	16.40
16	680	9.34	186.75	0.017000	3.17
17	700	6.78	135.55	0.004102	0.56
18	720	4.54	90.78	0.001047	0.10
19	740	3.11	62.27	0.000249	0.02
20	760	2.33	46.50	0.000060	0.00
21	780	0.97	19.38	0.000015	0.00

総和 3947 = 放射量

総和 1463 = 測光量

表1の(b)欄の最下行に、可視波長範囲における放射量を示しました。この例では、可視波長範囲の放射量3947単位は、測光量1463単位に相当することを表わしています。すなわち、この放射量3947単位のうち、1463単位分が明るさ感覚に寄与するというわけです。

ところで、放射量が3947単位である555nmの単色光の測光量は、同じく3947単位です(555nmの分光視感効率の値は1だから)。したがって、“この放射の測光量は、555nmの単色光の測光量の1463/3947=約1/2.7である”，と解釈することができます。すなわち、放射のエネルギー密度が適当な基準値に対して相対的に与えられていても、その測光量は、555nmの単色光の測光量(=放射量)を基準として相対的に測ることができるわけです。これで、エネルギー密度は必ずしも絶対的に与える必要がないことが、おわかりになったでしょう。

[測光量および放射量の計算式]

波長を λ 、分光視感効率を $V(\lambda)$ 、放射の分光分布を $P(\lambda)$ とし、可視波長範囲に、等間隔 $\Delta\lambda$ おきに n 個の分点

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ をとる。そして、各分点を中心に幅 $\Delta\lambda$ の小範囲を考えると、これらすべてで可視波長範囲をおおうようにする。このとき、測光量および可視波長範囲内の放射量は、それぞれ次のように計算される。

$$\text{測光量} = V(\lambda_1)P(\lambda_1)\Delta\lambda + V(\lambda_2)P(\lambda_2)\Delta\lambda + \dots + V(\lambda_n)P(\lambda_n)\Delta\lambda \\ = \sum_{i=1}^n V(\lambda_i)P(\lambda_i)\Delta\lambda,$$

$$\text{放射量} = P(\lambda_1)\Delta\lambda + P(\lambda_2)\Delta\lambda + \dots + P(\lambda_n)\Delta\lambda = \sum_{i=1}^n P(\lambda_i)\Delta\lambda.$$

4. 放射量や測光量の種類と単位

これまで、放射量や測光量の単位については、ふれませんでした。蛍光灯やスライドプロジェクタなどの光学機器の能力を測るときに、光学機器の出す放射エネルギーの総量が知りたいのか、それとも照らされる面の明るさを問題にしたいのかなど、場合によって知りたい放射量や測光量の種類や単位は違います。

よく使われる放射量や測光量の種類と単位について、簡単に説明することにします。図6を参照しながら理解してください。

(1) 放射束と光束

たとえば、スライドプロジェクタやOHP(オーバー

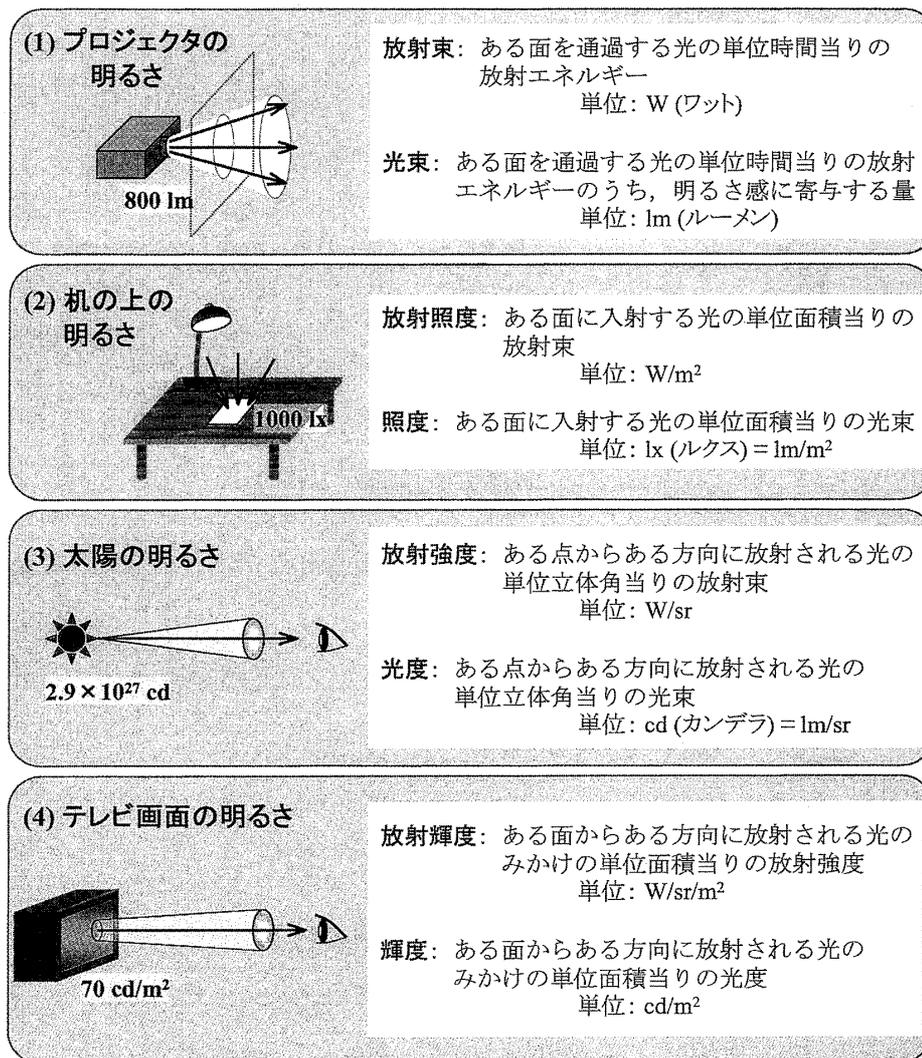


図6 放射量や測光量の種類と単位

ヘッドプロジェクタ)の能力を知りたいときには, これらの機器の発する放射のエネルギー(放射量)あるいは明るさ感を与える力(測光量)そのものが問題となります。このようなときには, ある面を通過する放射の, 単位時間当りの放射エネルギーあるいはその明るさへの寄与分を測ります。前者を放射束(radiant flux, 単位: W)といい, 後者を光束(luminous flux, 単位: lm)といいます。プロジェクタの取扱説明書を見ると, 何ルーメンの機器であるかが記されているはずで

(2) 放射照度と照度

電気スタンドで照らされた机の上の明るさを問題にするときには, 机の上に入射する光の, 単位面積当りの放射束や光束を測ります。前者を放射照度(irradiance, 単位: W/m²), 後者を照度(illuminance, 単位: lx = lm/m²)といいます。よく, “勉強するときは, 机上の照度が1000 lxくらいあったほうがよい” などといわれるので, 照度の単位はご存知でしょう。

(3) 放射強度と光度

星や太陽の明るさなど, 遠くから見て一点から発する光の明るさを問題にするときには, 見る方向に放射される光の, 単位立体角当りの放射束あるいは光束を測ります。前者を放射輝度(radiant intensity, 単位: W/sr), 後者を光度(luminous intensity, 単位: cd = lm/sr)といいます。ここに, sr(ステラジアン)は立体角の単位です。立体角については, 後で述べます。ちなみに, 光度の単位cd(カンデラ)は, ローソク(candle)に由来しています。

(4) 放射輝度と輝度

テレビやパソコンのディスプレイの画面の明るさなど, ある面から発する光の明るさを問題にするときには, 面から放射される光をある方向から見たとき, その方向へのみかけの面積当りの放射強度あるいは光度を測ります。前者を放射輝度(radiance, 単位: W/sr/m²), 後者を単に輝度(luminance, 単位: cd/m² = lm/sr/m²)といいます。上で“みかけの面積”という意味は, 図7に示すように, 光を発する面上の面積を, 見る方向に垂直な面上に換算したときの面積を指しています。

ほかにも, 放射量や測光量の種類はありますが, 省略しました。なお, 照明や色彩の分野では, 測光量として, 照度と輝度がよく使われます。

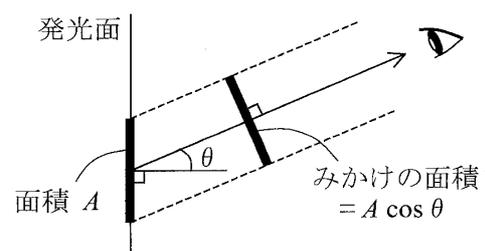


図7 みかけの面積

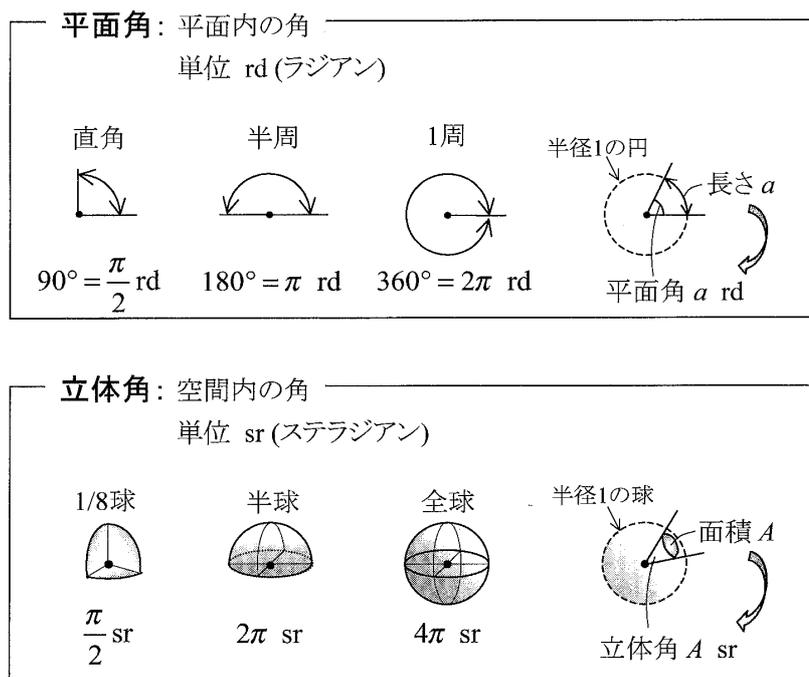


図8 平面角と立体角

[立体角とは]

図8を見て下さい。日常よく使う角は、平面内の一点からの広がり具合を表わす平面角であり、点の回りの一周を 360° 、半周を 180° 、1/4周(直角)を 90° などとしています。数学では、角を測る単位を度($^\circ$)ではなく、ラジアン(記号: rd)とすることが多いです。一点を共有する二本の半直線が半径1の円を切りとる弧の長さが a であれば、この二本の半直線のなす角は $a \text{ rd}$ となります。

平面角に対し、三次元空間内の一点からの広がり具合を表わす角を、立体角と呼びます。一点を中心とする半径1の球の面積 4π で、空間全体への広がり具合の立体角を表わします。このときの単位をステラジアン(記号: sr)と呼びます。半球に相当する広がり具合は $2\pi \text{ sr}$ 、1/8球であれば $\pi/2 \text{ sr}$ という具合です。一般に、一点を頂点とする錐が半径1の球を切りとる面分の面積が A であれば、この錐の立体角は $A \text{ sr}$ となります。

[放射量と測光量の間単位の関係]

放射の分光分布が相対値で表わされているならば、放射量や測光量もやはり何らかの基準値に対する相対値となります。このような放射量や測光量を、それぞれ相対放射量および相対測光量と呼ぶことにします。一方、分光分布が単位をもつ量として測られているならば、放射量や測光量も単位をもつ量となります。このときこれらの量を、それぞれ絶対放射量および絶対測光量と呼ぶことにしましょう。

ところで、波長555nmの単色光が1Wの放射量(放射束)

をもつとき、この光の測光量(光束)は683 lmであるとされています。したがって、放射の分光分布 $P(\lambda)$ が単位をもつ量として測られているならば、その絶対測光量は次のように計算できます。

$$\text{絶対測光量} = \sum_{\lambda} P(\lambda) \Delta \lambda \times 683 \text{ lm/W}$$

たとえば、500nmの単色光の放射量(放射束)が1Wであるとき、その測光量(光束)は、

$$0.323 \times 1 \text{ W} \times 683 \text{ lm/W} = \text{約 } 221 \text{ lm}$$

となります。

つぎに、分光分布は相対値で与えられているけれども、その(可視波長範囲の)絶対放射量がわかっている場合に、絶対測光量を計算する方法を考えてみましょう。

たとえば、図5の分光分布をもつ放射が机上に降りそそいでいるとして、その絶対放射量(放射照度)が 1 W/m^2 であるときの、絶対

測光量(照度)を計算してみます。この場合の相対放射量は3947単位でした。これが 1 W/m^2 に相当するわけですから、相対放射量の1単位はじっさいは $(1/3947) \text{ W/m}^2$ に当るわけです。したがって、1463単位の相対測光量は、じっさいは $1463 \times (1/3947) \text{ W/m}^2$ になります。これを、絶対測光量として表わせば、

$$1463 \times \frac{1}{3947} \text{ W/m}^2 \times 683 \text{ lm/W} = \text{約 } 253 \text{ lm/m}^2 = 253 \text{ lx}$$

となります。以上の計算法を一般的に書くと、絶対測光量は次の式で計算されます。

$$\text{絶対測光量} = \text{相対測光量} \times \frac{\text{絶対放射量}}{\text{相対放射量}} \times 683 \text{ lm/W}$$

* * *

今回は、これで終わります。用語は、できるだけJIS(Z 8105, Z 8113, Z 8120)の定義にそうようにしましたが、わかりやすさと一般的な概念への接続を考え、少し変更したものもあります。ご容赦下さい。なお、分光視感効率の数値は、

大田登: 色彩工学, 東京電機大学出版局, 1993;
日本色彩学会(編): 新編色彩科学ハンドブック[第2版], 東京大学出版会, 1998

などに出ています。

今回は“光を測る”考え方の延長で、“色を測る”話に移りたいと思います。