

# 生態環境としての光の計測

高見晋一

(近畿大学大学院農学研究科)

## Light measurement in Ecological Studies

Shinichi TAKAMI

(Kinki University, Graduate School of Agriculture)

### 1. はじめに

光は私たちにとって身近な存在である。したがって、ほとんどの人は日常生活に大きな支障がない程度には光というものを理解しているに違いない。しかし、こと科学的理解となるとおぼつかない。生物系科学や環境科学分野では、学生はもちろん研究者の間でもしばしば誤解、混乱がみられるからだ。たとえば、光の測定といえば、いまだに照度計しか思い浮かばない人がいる。一方、光量子センサーによる測定を選んだとしても、その意味、根拠が十分、理解されていないことがある。もっとも、これは使う側、学ぶ側の責任だけではない。以下、このような状況がもたらされた経緯をレビューし、生態環境(生態系を構成する環境)としての光はどのように計測すべきかを考えてみよう。なお、ここでは、微生物だけが息できる極限的な環境ではなく、動物、植物も存在する一般的な生物圏の環境を対象とする。温度範囲でいえば、地表面平均温度 15℃を中心にプラスマイナス数十度の範囲である。

### 2. 光とは何か

広義の光とは、およそ 1 nm ~ 1 mm の波長範囲の電磁波で、紫外線 (1 nm ~ 400 nm)、可視光線 (400 ~ 750 nm) および赤外線 (750 nm ~ 1 mm) を含む (物理学辞典編集委員会, 2005)。波長 1 nm 以下の電磁波は放射線 (X 線, ガンマ線など), 1 mm 以上は電波 (マイクロ波, 短波など) とよばれる (図 1)。つまり、電磁波は大きく分けると放射線, 光, そして電波に分類できる。ただし、光と X 線との境界およびマイクロ波との境界はある程度任意であり、分野あるいは書物によって少しずつ異なる。

一方、狭義の定義では、可視光のみをさす。もっともこの可視光の波長域も、たとえば理科年表 (国立天文台, 2008) では 380 ~ 770 nm, 国際照明委員会では 360 ~ 830 nm で、一義に定まっているわけではない。可視光に関する定義がこのように不明確なものも無理はない。純粋に物理的、生物的測定ではなく、心理的な要素が加わっ

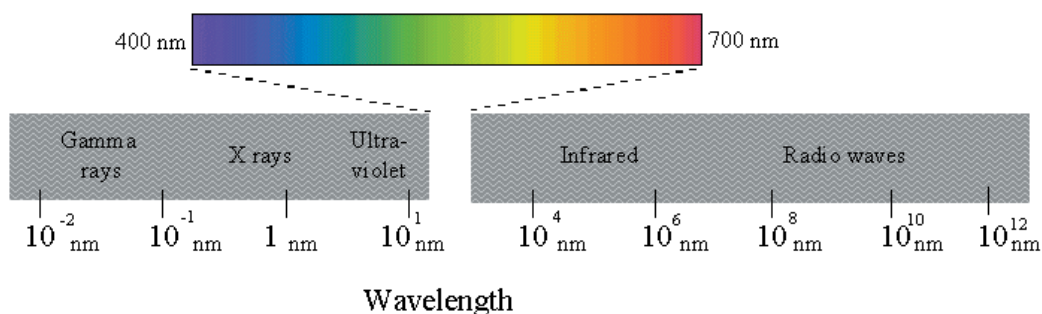


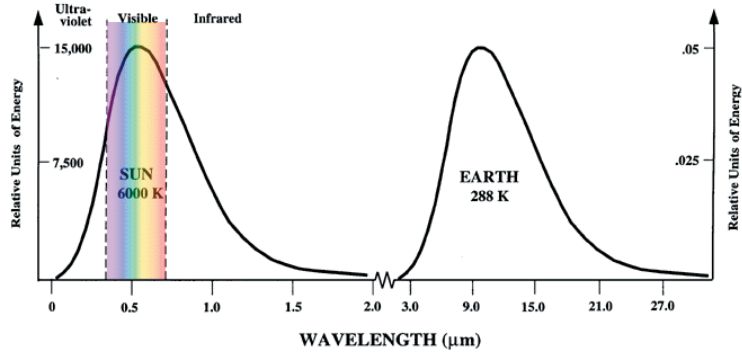
図1 電磁波の波長域による分類

([http://www.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/images/em\\_spectrum.gif](http://www.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/images/em_spectrum.gif), Jul 6, 2008)

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/agrmet/sk/2011/A-1.pdf>

2011年3月10日掲載

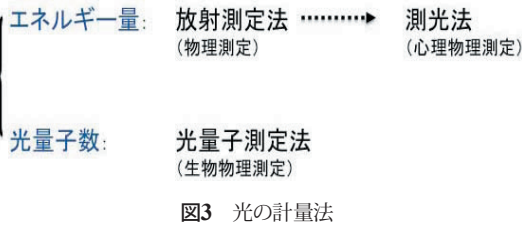
Copyright 2011, The Society of Agricultural Meteorology of Japan



Comparison of the emission spectra of the sun and the earth. Note the huge disparity in the amount of energy emitted by the sun (left-hand scale) and the earth (right-hand scale).

図2 日射と地表放射の分光エネルギー分布

<http://wxpaos09.colorado.edu/radiation/emissionspec.gif> (2008/7/6)



ているため、本来、厳密には定めることができないからだ。光はまた粒子としてもふるまう。光を粒子として捉えるときは光子あるいは光量子とよぶ(注1)。このように、光はその本質がそもそも難解だ。しかも、波長域による区分も明確とはいえない。これが混乱や誤解が生じる第一の原因である。

日射(図2)との関係を見ると、地上で観測される日射はほぼ広義の光に相当する。また、ランプやほとんどの照明装置も、当然ながら、可視光を中心とした光がその放射の大部分を占める。一方、地表をはじめ多くの物体からの放射はほとんどが赤外線で、可視光線は極めてわずかである(注2)。ただし、昆虫には紫外線が、蛇などの夜行性動物には赤外線が“可視”光となる。

### 3. 光の計量法

光の計量法には3つのシステムがある(図3)。放射

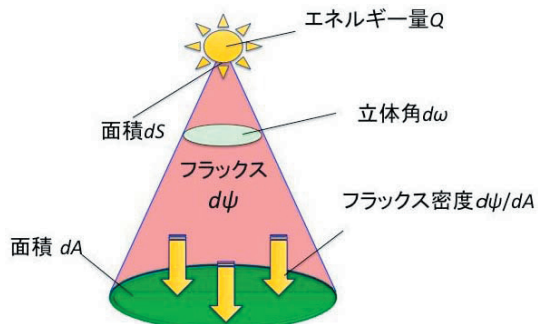


図4 光源のエネルギー量、フラックス(束)及びフラックス密度の相互関係

測定法 (radiometry), 光量子測定法 (quantum flux measurement), それに測光法 (photometry) である。このうち、基本となるのは、光のもつエネルギー量を測定する放射測定法と、光に含まれる光量子数を測る光量子法である。一方、測光法は、特別のフィルター(人間の目の感度にあわせたフォトセル)を通したエネルギーを測定する、二次的な測定法である。この派生的な、特殊な測定法である測光法が最も早く発達し、広く普及してしまったのが、混乱、誤解の第二の原因である。

放射測定法とは、放射エネルギーに時間と空間量とを

表1 放射測定法、測光法ならびに光量子測定法の測定対象量とそれぞれの単位

	放射測定法	測光法	光量子測定法
エネルギー	放射エネルギー [J]	光量 [lm・s]	光量子数 [μmol]
束(フラックス)	放射束 [J/s, W]	光束 [lm]	光量子束 [μmol/s]
強度	放射強度 [W/sr]	光度 [cd]	光量子強度 [μmol/(s・sr)]
フラックス密度	放射束密度 [Wm <sup>2</sup> ]	照度 [lm/m <sup>2</sup> , Lx]	光量子束密度 [μmol/(sm <sup>2</sup> )]

表2・1, 表2・2 (「光の計測マニュアル」照明学会編 1990日本理工出版会)を一部改変

組み込んで種々の「放射量」を定義し、それらを物理的に測定する方法である。はじめに、1秒間あたり  $Q$  [J] の光放射エネルギーをその周囲に様に射出している光源を想定する(図4)。光源が、たとえば太陽ならばそのエネルギーは毎秒  $3.83 \times 10^{23}$  Jである(注3)。いま、この光源を中心( $O$ )として半径  $r$  mの球面を考え、そのなかに微小面積  $dA$ をとれば、 $O$ を頂点とする円錐状の光の束を想定することができる(図4)。この束が放射束(radiant flux)  $d\psi$ である。この放射束は、同一球面上はもちろん、 $r$ が大きくなっても一定である。しかし、通常、環境を規定する量として必要なのは次式で定義される放射照度(irradiance)  $F$  [ $W/m^2$ ]で、これは受光面積に反比例して減少する。

$$F = d\psi/dA \quad (1)$$

単位面積当りの放射量は、光源の放射面についても規定することができる。放射束  $d\psi$ が射出される微小面積を  $dS$ とすれば(図4)、この量、放射発散度(emittance)  $E$ は次式で定義される。

$$E = d\psi/dS \quad (2)$$

表面温度を 5770 Kとしたときの太陽放射の場合、その放射発散度は  $6.30 \times 10^7$   $W m^{-2}$ で(注4)、地球の大気外縁で測った放射照度は  $1.37 \times 10^3$   $W m^{-2}$ (太陽定数)となる。なお、以上2つの量は、いずれも単位面積当りの量つまり密度であるから、放射束密度(radiant flux density)とよばれる。

放射発散度は、光源の「強さ」を表すとみなせる(注5)。光源の「強さ」は、また、立体角あたりの放射束で表すことができる(点光源の場合は、面が定義できない)。これが放射強度(radiant intensity)  $I$ である。 $I$ は  $dS$ に対応する微小立体角  $d\omega$ ( $= dA/r^2$ )を用いて、次式で定義される。

$$I = d\psi/d\omega \quad (3)$$

さらに、射出面あるいは被照面の見かけの面積を考えると、その単位面積あたりの放射強度を定義することができる。これが放射輝度(radiance)である。

光計測に関して混乱や誤解を生じる第三の原因は、使われる術語が多く、かつ紛らわしいことである。そこで、これらの術語を整理しておこう(表1)。Jを単位とする放射エネルギーのかわりに、光子数[mol]を基本とするのが光子測定法、 $lm \cdot s$ という奇妙な単位をもった光量を基本とするのが測光法である。これらの基本量をつかえば、「光子量」あるいは「測光量」に対しても、「放射量」と同様の諸量を定義することができる。なお、放

射強度と放射輝度は、リモートセンシングで非常に重要な役割を果たす(Campbell and Norman, 1998)。しかし、放射束密度と違って、視野角(view angle)に大きく左右される。したがって、放射束密度の方が、環境を特徴づける量としては一般性が高い。また、測定も方向依存性の放射量に比べて容易である。そこで、本稿では、以下、この放射束(光束、あるいは光子束)密度を対象とする。

### 3.1 放射測定法

生態環境上重要なのは、日射(短波)と大気および地表からの放射(長波)である。両者はその波長域が大きく異なるため(図2)、それに応じて後で述べるように測器も異なる。しかし、いずれも放射エネルギーを熱に変えて測定するのが最も基本的な測定法である。また、通常は、対象とする放射の波長域全体に渡るエネルギー量  $E$  [ $W m^{-2}$ ]を測る。したがって、もし、同時に波長別放射計でも測定したとすれば、その測定値すなわち波長間隔  $\Delta\lambda$  nmあたりの平均放射束密度  $e\lambda_n$  [ $W m^{-2} (\Delta\lambda \text{ nm})^{-1}$ ]と  $E$  [ $W m^{-2}$ ]との間には、次の関係が成り立つ。

$$E = e\lambda_1 \cdot \Delta\lambda + e\lambda_2 \cdot \Delta\lambda + \dots + e\lambda_n \cdot \Delta\lambda \quad (4)$$

日射は直達光と散乱光からなる。これらは別々に測ることができる(Robinson, 1966)が、我々が通常必要とするのは、両者を合わせた全天日射(global irradiance)である。これは、全天日射計(pyranometer)を地表面に水平において測る。この測器は感部がガラスあるいは石英のドームで被覆されており、雨風を防ぐと同時に 350 ~ 2800 nm(ガラス)あるいは 250 ~ 4000 nm(石英)の短波光を透過させる(Sellers, 1965)。長波放射計はガラスの代わりに長波に透明なポリエチレンフィルムで被覆する。あるいは、感部に何も被せず測定する。ただし、その際は風などによる影響をさける工夫が必要だ。

### 3.2 光子測定法

ある物質の分子1個の質量を  $w$ 、アボガドロ定数を  $Na$ ( $= 6.02 \times 10^{26}$ )とすれば、この物質の分子量は  $w \cdot Na$ である。よって、この物質  $m$  [g]は  $m/(w \cdot Na)$  [mol]に相当する。同様に、光子を分子のように取り扱えば、 $Q$  [J]の光エネルギーには光子が  $Q/(e \cdot Na)$  [mol]含まれることが分る。ここで  $e$ は光子1個がもっているエネルギーで、プランクの定数  $h$  ( $6.63 \times 10^{-34}$  J s)、光の速さ  $C$  ( $3.00 \times 10^8$  m/s)、そして波長  $\lambda$  (nm)から次のように求められる。

$$e = hC/\lambda = ((1.99 \times 10^{-16})/\lambda)J \quad (5)$$

よって、この光子1 molのエネルギー  $E$ は

$$\begin{aligned}
 E &= e \cdot Na = e[\text{J}] \times (6.02 \times 10^{23})[\text{1/mol}] \\
 &= 1.20 \times 10^8 / \lambda [\text{J/mol}]
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

このように、1 mol の光子がもつエネルギーが分ると、 $Q$  [J] のエネルギーをもつ光の、mol で数えた光子数  $n$  が、次のように求められる。

$$n = Q \cdot \lambda / (1.20 \times 10^8) \text{ [mol]} \tag{7}$$

式(6)と(7)をことばでいかえると次のようになる。エネルギー量 ( $Q$ ) が同じならば、波長が長い光ほど多くの光子を含む。それは、波長の長い光の方が、光子 1 mol (あるいは一個) のもつエネルギーが少ないからだ(注6)。

ただし、以上の関係は単色光に対して成り立つものである。種々の波長別放射から構成されている通常の光については、 $\lambda$  のかわりに次のように定義される平均波長

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \Delta e_{\lambda} \Delta \lambda}{\sum \Delta e_{\lambda}} \tag{8}$$

を用いればよい。たとえば、地上における日射の  $\bar{\lambda}$  は 550 nm (緑色光) であることが分っている。したがって、PAR が  $500 \text{ W m}^{-2}$  の日射は、以下のような計算から、 $2290 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  に等しいことが導かれる。なお、PAR で  $500 \text{ W m}^{-2}$  という日射は、全天日射量で約  $1000 \text{ W m}^{-2}$  で、中緯度の晴天日における正午頃の日射量である (Campbell and Norman, 1998 の例 10.1 より)。

$$\begin{aligned}
 &500 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 550 (\text{mol/J}) / (1.20 \times 10^8) \\
 &= 2.29 \times 10^{-3} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \\
 &= 2290 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \\
 &= 2290 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}
 \end{aligned}$$

### 3.3 測光法

照明工学分野で独自に発展してきた測定法 (田幸ほか, 1994) で、人間の比視感度曲線をフィルターとし、かつ光量 (放射エネルギーに対して測光エネルギーともいう) を単位とする特殊な測定である。環境量としては lx (ルクス) を単位とする光束密度 (別名、照度) を測定する。

光束密度は、放射束密度から、以下のようにして求められる。まず、人の眼が感じるあかるさを放射エネルギーベースで  $E_L$  と表せば、式(4)から、次の関係がえられる。

$$\begin{aligned}
 E_L &= s(\lambda_1)(e_{\lambda_1} \cdot \Delta \lambda) + \dots \\
 &+ s(\lambda_n)(e_{\lambda_n} \cdot \Delta \lambda)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

ここで、 $s(\lambda)$  は、標準的な目の波長別の感度を表す一種のフィルターで、標準比視感度とよばれる。人間の目は波長 555 nm の光 (緑黄色) に最も感受性が高く、青

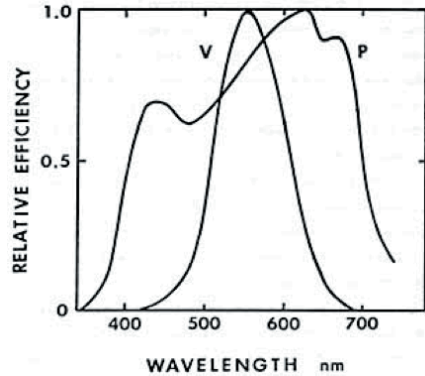


図5. 人間の目(V)と光合成(P)の比感度曲線(McCree, 1973)

色と赤色の光に対しては低い。そこで、CIE (国際照明委員会) は、この標準比視感度  $s(\lambda)$  を次のように定めている (図5)。すなわち、555 nm で 1.0 という極大値をとり、その両側では次第に減少し、430 nm と 720 nm で 0.001、360 nm 以下および 830 nm 以上では 0 という値をとる。

つぎに、最大比視感度とよばれる比例係数  $K_m$  [lm/W] を導入して、放射エネルギーベースの明るさ  $E_L$  を、測光量である照度  $L$  (表1) に変換する。

$$L = K_m \cdot E_L \tag{10}$$

ここで、 $K_m$  は  $s(\lambda) = 1$  のときの波長 ( $\lambda = 555 \text{ nm}$ ) において測光量と放射量を関係づける値であり、1979年の第16回国際度量衡総会で、 $K_m = 683 \text{ lm/W}$  と規定された。いいかえれば、 $\text{lm} (= 1/683 \text{ W})$  という別の単位を導入して、エネルギーベースの値を 683 倍すれば、おなじみの照度 (lx) 単位の数値が得られる (演習問題参照)。

光の照度とその放射束密度との比を発光効率 (luminous efficiency) という。これは、同一エネルギーの光が、照明としてはどのくらい明るいかわかる数値である。たとえば、500 W の白熱ランプは 252 で、382 の蛍光灯 (白暖色) より照明用の光源としては効率が低い。このような違いが生じるのは、光源の分光エネルギー分布が異なるからである。直感的に分かるように、可視域に多くのエネルギーを含む光ほどこの効率は高い (演習問題参照)。

## 4. 生態環境としての光計測

3章でみたように、3つの測定法のうち、測光法は人間の目を感じる明るさに関係する分野 (照明工学、建築学など) 以外ではほとんど意味がない。したがって、以下では放射測定法と光子数測定法の2つだけを取りあげる。



具体的な測定法の詳細やセンサー類については、たとえば村岡 (2003) を参照されたい。ここでは、測定法の原理的側面に重点をおく。

#### 4.1 温熱環境

温度を総合指標とする熱・水分環境を把握するには、放射測定を行なう。これは、日射計をはじめ、各種の放射計によって今では比較的容易に行なうことができる。標準的な表面放射収支観測では、全天日射計、反射日射計および正味放射計を設置する。普通、反射日射計としては全天日射計を下向きにしたものを使う。正味放射計の代わりに大気からの下向き放射と地表面からの上向き放射を別々に測ってもよい。その場合、正味放射は次の定義式から求まる。

$$\begin{aligned} \text{正味放射} = & \text{全天日射量} - \text{反射日射量} \\ & + \text{大気放射量} - \text{地表面放射量} \end{aligned} \quad (11)$$

この正味放射が、結局、地面や大気を暖め、蒸発のエネルギー源となる。しかし、温熱環境に対する生物の反応は、「温度反応」として「光反応」とは別の生理学的機構にしたがう。また、入力側（環境計測）としては温度計測という別の分野に属する。したがって、ここではこれ以上たちいらぬ。ただ、ひとつだけ注意しておきたいのは、気温に代表される温熱環境を把握するには日射だけではなく、大気や地表面、あるいは樹木などからの目には見えない赤外放射も考慮すべきであるということだ。

#### 4.2 光合成（生産）環境

1970年代初頭までは、高等植物における光合成有効放射 (PAR) の波長域は知られていたが、作用スペクトルすなわち波長別感度特性は分っていなかった。したがって、粗い近似として 400 ~ 700 nm の波長域では  $s(\lambda) = 1$ 、その外側では  $s(\lambda) = 0$  として、全天日射計にカットオフフィルターをかけて測定した量を PAR としていた（熱量ベース PAR）。室内実験に使う光源の分光特性は、光源によって大きく異なる。したがって、一般には、全放射量が同じでも、PAR は光源によって大きくことなる（演習問題参照）。これに対して、太陽光中に含まれる PAR の割合は、天候や季節による変化が少なく、全天日射量の約 47% である（注 7）。

光合成は、しかし、光化学反応である。したがって、光合成有効放射はエネルギーベースではなく、光子数単位で測定しなければならない。このような考えに基づいて、McCree (1972a, 1972b) は、高等植物種の光合作用スペクトルを実験的に確定し、光合成有効放射としては波長域 400 ~ 700 nm の光子束密度 (PPFD, photosynthetic photon flux density) をそのまま全て測るのがもっとも適切であることを示した。藻類と同様、高

等植物の光合成効率も、たとえば赤色光の方が青色光より高いといった波長依存性を示す（図 5、注 8）。しかし、PAR が  $100 \text{ W m}^{-2}$  以上になると光合成過程は  $\text{CO}_2$  律速となり、波長別の光合成効率はほとんど差がなくなる。したがって、実際上は、この波長域の全ての波長について感度を 1 とした比感度曲線を使えばよい。これが、McCree の到達した結論である。現在、広く使われている光子センサーはこの結論に準拠している。

#### 4.3 情報源としての光

生物は、生命を維持していくためのエネルギー源として、また適切な生育環境を獲得するための情報源として光を利用して来た（津田, 1999）。このうち、エネルギー源としての光は、上述 (4.2) のように、光合成というただ一つのプロセスに関与するだけである。一方、情報源としての光は、非常に多くのプロセスで利用される。生物時計、動物の視覚、植物の光形態形成など様々である。

このように、生物には外界の変化を感知して適切な行動をとるため、極めて多岐にわたる光への応答システムが発達している。これらの応答は、光化学反応に基づくものと、放射熱による赤外シグナルの検知に基づくものの 2 種類に分けることができる。後者の代表的な例としては、ヘビによる赤外線検知があげられる。ヘビは、光化学変換ではなく、ピット器官内の赤外線受容体によって、赤外シグナル（波長 750 nm ~ 1 mm）を検知していることが分ってきた (Gracheva, *et al.*, 2010)。したがって、このような場合には、光情報を放射エネルギーとして、放射計で計測すればよい。

一方、光化学反応としては、光で誘導される様々な生理現象があげられる（佐藤・和田, 2000）。その光の要求性は現象によって、また生物によって様々である。それぞれの現象に有効な波長域があるとともに、照射される時間の長さがどれくらい必要かもまちまちだ。また、必要とするエネルギー量も様々だ。しかし、どの現象も必ず光受容体が光子を吸収しないと起らない。したがって、これらの現象を取り扱う場合は、光子計による光子束密度の測定が行なわれる。ただし、単波長光の場合は、その放射エネルギーから光子数を簡単に導くことができる（式 7）ので、光子数のかわりに放射エネルギーを測定してもよい。また、光源の分光放射強度あるいは被照射面の分光放射照度が分っていれば、平均波長 (8) を使って単波長光の場合と同様、放射エネルギーの測定から光子数をもとめることができる。なお、こういった光に対する生物の応答を、生体電位などの生物物理量で測ることができれば、物理的意味が明確な作用スペクトルが得られる。

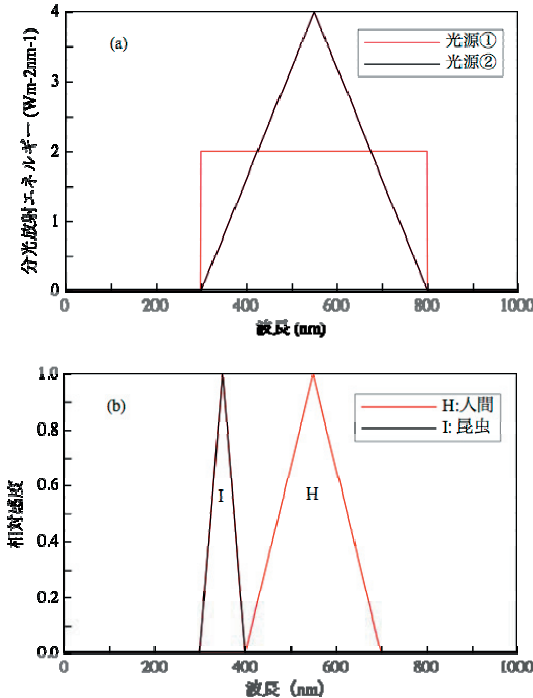


図6 仮想的な2つの光源の分光エネルギー分布(上)と昆虫並びに人の相対視感度曲線(下)

### 演習問題

以下のような仮想的な条件を設定して、光の3つの測定法を比較してみよう。まず、全放射エネルギー量は等しいが、分光エネルギー分布が異なる2つの光(図6a)を想定する。次に、人間の目の比視感度曲線も図中のHで示したように単純化する(図6b)。さらに、図中のIで示したような比視感度曲線をもつ昆虫がいるとする。

- (1) 放射測定法によれば、分光放射エネルギー分布が①の場合、この光の、全放射量、PAR、人間と昆虫の目が感じるエネルギー量はそれぞれいくらか。
- (2) 量子測定法によれば、分光放射エネルギー分布が①の場合、この光のPPFD、人間および昆虫が視覚として受容する量子数はいくらか。ただし、量子に対する人間および昆虫の視感度は、光合成と同様、それぞれの感度波長域では、波長には依存しない(感度=1.0)とする。
- (3) 測光法によれば、この光の明るさはどのくらいか。分光放射エネルギー分布が①と②の場合を比較せよ。なぜ、②の方が明るいのか。
- (4) 光源の分光エネルギー分布が②のとき、昆虫が視覚として受容する分光エネルギーを求めよ。

表2 仮想的な昆虫の比視感度 $S_\lambda$ と光源の分光エネルギー分布 $e_\lambda$ から求めたこの昆虫の視感分光エネルギー

波長 $\lambda$ (nm)	感度 $S_\lambda$	分光エネルギー $e_\lambda$ ( $\text{Wm}^{-2} \text{nm}^{-1}$ )	$S_\lambda * e_\lambda$ ( $\text{Wm}^{-2} \text{nm}^{-1}$ )
300	0.00	0	0.00
310	0.20	0.16	0.03
320	0.40	0.32	0.13
330	0.60	0.48	0.29
340	0.80	0.64	0.51
350	1.00	0.80	0.80
360	0.80	0.96	0.77
370	0.60	1.12	0.67
380	0.40	1.23	0.51
390	0.20	1.44	0.29
400	0.00	1.60	0.00

[解]

- (1) 全放射量はこの矩形の面積に等しいから  
 $(800-300) \text{ nm} \times 2.0 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} = 1000 \text{ W m}^{-2}$   
 PARは、この矩形のうち  $x = 400 \text{ nm}$  と  $x = 700 \text{ nm}$  で切り取られた部分の面積に等しいから  
 $(700-400) \text{ nm} \times 2.0 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} = 600 \text{ W m}^{-2}$   
 人間が視覚として受容するエネルギーは、この矩形のうち、底辺が  $x = 400 \text{ nm}$  と  $x = 700 \text{ nm}$  の間にあって、頂点が座標  $(550 \text{ nm}, 2.0 \text{ Wm}^{-2} \text{ nm}^{-1})$  で切り取られる三角形の面積に等しいから  
 $(700-400) \text{ nm} \times 2.0 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} / 2 = 300 \text{ W m}^{-2}$   
 同様に、昆虫が視覚として受容するエネルギーは  
 $(400-300) \text{ nm} \times 2.0 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1} / 2 = 100 \text{ W m}^{-2}$
- (2) それぞれの放射エネルギーは  $600 \text{ W m}^{-2}$ 、 $300 \text{ W m}^{-2}$  および  $100 \text{ W m}^{-2}$ 、平均波長は  $550 \text{ nm}$ 、 $550 \text{ nm}$ 、および  $350 \text{ nm}$  なので、式(7)よりそれぞれ、 $2750 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $1375 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  および  $292 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  となる。
- (3) ①の光については人が視覚として受容するエネルギーが  $300 \text{ W m}^{-2}$  なので、式(10)より、  
 $(683 \text{ lm/m}^2) 300 = 205 \text{ klx}$   
 一方、②の光については、人が視覚として受容するエネルギーは  
 $(700-400) \text{ nm} \times 4.0 \text{ Wm}^{-2} \text{ nm}^{-1} / 2 = 600 \text{ W m}^{-2}$   
 すなわち、①の2倍なので、明るさも2倍の  $410 \text{ klx}$  となる。これは、②の光源の方が①よりも、可視域に多くのエネルギーを含むからである。
- (4) この光源の波長別分光エネルギーを読み取ると、第3列(表2)のような  $e_\lambda$  値が得られるので、感度  $S_\lambda$  で補正すると、第4列に示したような視感(視覚として

受容する) 分光エネルギー  $S\lambda \cdot e\lambda$  値が得られる。

## 注

- (1) 光の3つめの定義として、放射が光量子として働くときを光とよぶことがある。この定義も、太陽光発電と太陽熱発電のように、かなり一般的に使われる。
- (2) 物体が高温になれば、多くの可視光が放射される(ウィーンの変位則)。しかし、ここでは常態として存在する、自然の物体を対象とし、たとえば火災に伴う燃焼体や溶岩流といったような突発的な現象に伴う高温物体は、除外する。
- (3) 太陽定数に太陽—地球間の距離を半径とする球面の面積をかけることによって求めることができる。
- (4) ステファン—ボルツマンの法則で射出率を1として求める。
- (5) それ故、放射束密度あるいは光束密度はしばしば「放射(光)強度」とよばれるが、この使い方は正しくない。強度は式(3)のように方向性を有する全く別の量として定義されているからだ。
- (6) 光子を穀粒に、光子のもつエネルギーを体積にたとえよう。すると、同じ容積(エネルギー総量)のマスなら、マス一杯の粒数はコメ(青色光)よりアワ(赤色光)の方が多い。一粒の体積(エネルギー)が、コメ(青色光)よりアワ(赤色光)の方が小さいからだ。
- (7) 散乱光が多くなると、この割合は大きくなる。いいかえれば、散乱光は直達光より光合成有効放射の割合が高い。
- (8) McCree は 22 種の高等植物について、包括的かつ精密な測定を行ない、この比感度曲線は、通常の条件下で生育した植物ならば、種や齢にかかわらず同一とみなせることを明らかにした。

## References

物理学辞典編集委員会, 2005: 物理学辞典, 培風館, 東京, 2260p.  
 Campbell, G. S., and Norman, J. M., 1998: *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer, New York, 286p.  
 Gracheva, E. O., Ingolia, N. T., Kelly, Y. M.,

Cordero-Morales, J. F., Hollopeter, G., Chesler, A. T., Sánchez, E. E., Perez, J. C., Weissman, J. S., and Julius, D., 2010: Molecular basis of infrared detection by snakes. *Nature*, **464**, 1006–1011.  
 国立天文台, 2008: 理科年表, 丸善書店, 東京, 1060p.  
 McCree, K. J., 1972a: The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.*, **9**, 191–216.  
 McCree, K. J., 1972b: Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, **10**, 443–453.  
 McCree, K. J., 1973: A rational approach to light measurements in plant ecology. *Curr. Adv. Plant Sci.* **3**, 39–43.  
 村岡裕由, 2003: 植物にとっての光環境の評価。光と水と植物のかたち—植物生理生態学入門(村岡裕由・可知直毅編)。文一総合出版, 東京, pp 215–228.  
 大石 正・小野高明, 2000: 光環境と生物の進化(シリーズ/光が拓く生命科学第2巻)。共立出版, 東京, 180p  
 Robinson, N., 1966: Instruments and Experimental Methods, *In Solar Radiation* (Robinson, N. ed, 346p), Elsevier Publishing Company, Amsterdam, pp 222–316.  
 佐藤公行・和田正三, 2000: 生命を支える光(シリーズ光が拓く生命科学第3巻)。共立出版, 東京, 204p.  
 Sellers, W. D., 1965: *Physical Climatology*. The University of Chicago Press, Chicago & London, 272p.  
 照明学会編, 1990: 光の計測マニュアル。日本理工出版会, 東京, 453p.  
 田幸敏治, 辻内順平, 南 茂夫(編), 1994: 光測定ハンドブック。朝倉書店, 東京, 818p.  
 津田基之(編), 1999: 生物の光環境センサー(シリーズ/光が拓く生命科学第1巻)。共立出版, 東京, 165p.  
<http://www.wxpaos09.colorado.edu/radiation/emissionspec.gif>, Jul 6. 2008  
<http://www.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/images/empectrum.gif>, Jul 6. 2008