



ON Semiconductor®

www.onsemi.jp

基礎的な放射測定と光度測定

はじめに

オン・セミコンダクター製イメージ・センサの感度は、放射測定に関わる単位で測定され規定されます。これらの単位は電磁スペクトル全域にわたって意味を持ちます。放射測定に関わる単位は、ヒトの目の感度を基準とする測光量とは異なり、純粋な物理量です。したがって、光度測定とは、視覚を誘発する能力が電磁放射にどれほどあるのかを物理的に認識できる形で測定することを言います。「物理的に認識できる形で測定する」とは、ヒトの平均的な視覚特性として取り決めた「CIE(国際照明委員会)測光標準観測者」の目を介して測定することです。

本アプリケーション・ノートでは、放射測定および光度測定の基本的な概念と定義とをいくつか示すほか、一連の単位を別の単位に変換する方法も示します。

基本的な定義と概念

以下の解説では、放射測定と光度測定の基本的な概念と定義についてのみ示します。より詳細な解説については、本アプリケーション・ノートの末尾に記載した参考文献を参照してください。

光源はそのスペクトル分布曲線で囲まれた面積に比例する放射束(φ_e)を放射します。

$$\varphi_e = \int_0^{\infty} \varphi_{e,\lambda} d\lambda \quad (\text{W}) \quad (\text{eq. 1})$$

放射輝度(次式)とは、任意の点から見た表面に入る(あるいはその表面から出る)放射束を面積と立体角で割った値のことです。

$$L_e = \frac{d\varphi_e}{dA \cos \theta d\Omega} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{sr}} \right) \quad (\text{eq. 2})$$

ここで、光感覚を生じる能力が放射束にどれほどあるのかを求めるには、次式のように $\varphi_{e,\lambda}$ 曲線を光束に変換しなければなりません。

これは φ_e と比視感度(photoptic relative luminous efficiency function) $V(\lambda)$ を乗算すれば求まります。

$$\varphi_v = \int_{380}^{780} \varphi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (\text{W}) \quad (\text{eq. 3})$$

$V(\lambda)$ とは、規定の光度測定条件下で2つの放射束が同じ明所視感度を引き起こすとき、一方の放射束(波長 λ_m の放射束)と、他方の放射束(波長 λ の放射束)との比のことです。 λ_m の値はこの比の最大値が1になるように選ばれます。要するに、 $V(\lambda)$ とはヒトの目の感度が最大となる波長555 nmで1になるように正規化された、ヒトの目のスペクトル感度のことです。

Table 1に $V(\lambda)$ の値を示し、Figure 1にグラフを示します。

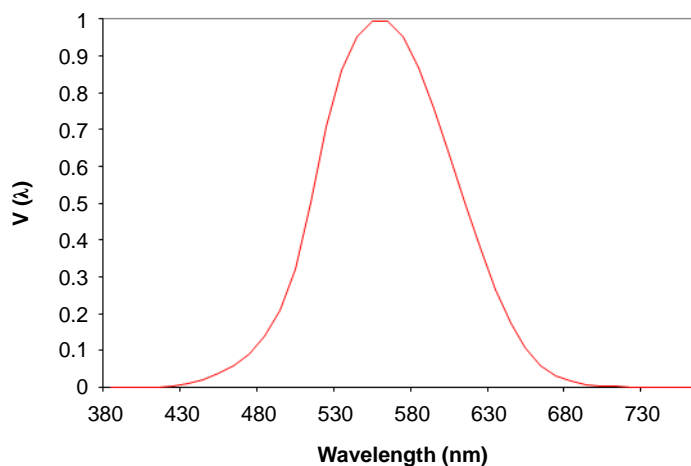


Figure 1. Photopic Response of the Human Eye (CIE Standard Observer)

Table 1. PHOTOPIC RELATIVE LUMINOUS EFFICIENCY FUNCTION V(λ) AND LUMINOUS EFFICACY OF THE STANDARD OBSERVER

λ (nm)	V (λ)	K (λ)	λ (nm)	V (λ)	K (λ)
380	0	0	580	0.87	594.21
390	0.0001	0.0683	590	0.757	517.031
400	0.0004	0.2732	600	0.631	430.973
410	0.0012	0.8196	610	0.503	343.549
420	0.004	2.732	620	0.381	260.223
430	0.0116	7.9228	630	0.265	180.995
440	0.023	15.709	640	0.175	119.525
450	0.038	25.954	650	0.107	3.081
460	0.06	40.98	660	0.061	41.663
470	0.091	62.153	670	0.032	21.856
480	0.139	94.937	680	0.017	11.611
490	0.208	142.064	690	0.0082	5.6006
500	0.323	220.609	700	0.0041	2.8003
510	0.503	343.549	710	0.0021	1.4343
520	0.71	484.93	720	0.001	0.683
530	0.862	588.746	730	0.0005	0.3415
540	0.954	651.582	740	0.0003	0.2049
550	0.995	679.585	750	0.0001	0.0683
560	0.995	679.585	760	0.0001	0.0683
570	0.952	650.216	770	0	0

V(λ)は無次元であり、φ_Vの単位はワット(W)のままでありますが、ここは視覚に関する話なので、光ワットと考えたほうがよいでしょう。

光束をワット(光ワット)から光度測定関連の単位であるルーメンに変換するには、次のように式3と最大視感度係数K_mを乗算してください。

$$\phi_V = K_m \int_{380}^{780} \phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (\text{lumens}) \quad (\text{eq. 4})$$

明所視の場合は、放射束の最大視感度(K_m)は683 lm W⁻¹です。

輝度は放射輝度に相当する光度測定単位のことであり、次式に示すように放射輝度と同様に定義されます。

$$L_V = \frac{d\phi_V}{dA \cos \theta d\Omega} \quad (\text{eq. 5})$$

放射束全体の視感度は記号Kで表現され、次式に示すように視感度Vと最大視感度係数K_mとの積で求まります。

$$K = V \cdot K_m = \frac{\phi_V}{\phi_e} \quad (\text{eq. 6})$$

光束をワットではなくルーメンで表現すると、V(λ)は放射束のスペクトル視感度K(λ)となります。単位は1 mW⁻¹です。

$$K(\lambda) = V(\lambda) \cdot K_m \quad (\text{eq. 7})$$

前述のとおり、検出器に入射した放射束がわかれば、知りたい量である光束に変換することが可能です。

放射測定および光度測定の用語と単位の関係を示した表を付録 II に示します。

放射測定単位から光度測定単位への変換

センサの放射測定感度(R_e)を光度測定感度(R_V)に変換するには、まず光源についての知識が必要です。光源が何らかの色温度を有していると規定されていて、かつ光源の発散度が完全黒体放射体と同じであると仮定した場合、その光源のスペクトル放射輝度は、次式のようにプランクの法則で与えられます。単位はW·cm⁻² nm⁻¹ sr⁻¹です。

$$L_{e,\lambda} = \frac{3.741 \times 10^{19}}{\pi \lambda^5 \left[e^{\left(\frac{14388000}{\lambda T} \right)} - 1 \right]} \quad (\text{eq. 8})$$

上式のλの単位はnm、Tの単位はケルビンです。

一般に人工光源と完全黒体はスペクトル分布が同じではありませんが、ここでは解説の目的上、両者とも同じであると考えことにします。Figure 2に、複数の黒体放射体のスペクトル放射輝度を示します。

センサの感度は、センサに到達する光子の数とエネルギーとの関係から導かれます。すなわちセンサの感度とは、光子を電子に変換する能力、最終的には出力電圧に変換する能力のことです。入射ビームの放射束が ϕ_λ で、光子のエネルギーが $E = h\nu$ の場合、検出器に到達する光子の数は $\phi_\lambda/h\nu$ です。検出器は、量子効率 ξ で光子を電子に変換するので、単位時間あたりに生成される電子の数は $N_{e-} = \xi\phi_\lambda/h\nu$ です。

各電子が出力信号に寄与する場合、その電圧は $N_{e-} = O$ です。 O は、電荷から電圧への変換率とセンサの内部利得との積です。単位は V/e^- です。結果として電圧は $V_\lambda = (\xi O/h\nu)\phi_\lambda$ となります。スペクトル感度は次式で求められます。

$$R(\lambda) = \frac{V_\lambda}{\phi_\lambda} = \frac{\xi O}{h\nu} \quad (\text{eq. 9})$$

センサが感度を有する波長域の全域で積分すると、全体の感度は次式で求められます。

$$R = \frac{\int_\lambda V_\lambda d\lambda}{\int_\lambda \phi_\lambda d\lambda} \quad (\text{eq. 10})$$

センサの出力は積分時間を無視すると、次のようになります。

$$V_{\text{out}} = L_e \cdot R \quad (\text{eq. 11})$$

光束についても同じ方法で感度が計算できます。これで光度測定感度 R_v を放射測定感度 R_e の関数で表せるところまで来ました。

$$R_v = \frac{\int_\lambda L_{e\lambda} R_{e\lambda} d\lambda}{K_m \int_\lambda L_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda} \cdot \lambda \quad (\text{eq. 12})$$

これは例を使って説明するのが良いでしょう。

例

3200Kのハロゲン光源とIRカットオフ・フィルタ・ガラス「BG-38」(2 mm厚)を使用するイメージング・アプリケーションでは、標準的なCFAを備えたイメージ・センサ「KLI-8013」が使われます。青チャネルの放射測定感度をTable 2の2列目に列挙しました。単位は $V\mu J^{-1}cm^{-2}$ です。青チャネルの光度測定感度(単位は $V(\text{lux sec})^{-1}$)はいくつでしょうか?

簡単にするため、また相対的な比較を行うだけなので、積分時間とイメージング・システムの光学素子による影響は無視します。

まず、ランプのスペクトル放射輝度を計算するか、実際の測定値(またはメーカーのデータ)を入手する必要があります。3200Kの光源の放射輝度を式8で計算し、その結果をTable 2の3列目に示しました。

センサに入射する実際の放射輝度は、次式のようにフィルタ・ガラス「BG-38」の影響を受けます。

$$L_{e\lambda, \text{net}} = L_{e\lambda} \cdot \tau_{\text{BG-38}} \quad (\text{eq. 13})$$

上式の $\tau_{\text{BG-38}}$ はフィルタ・ガラスの透過率です(表の4列目)。

本当は波長を無限に細かく分断した波長幅 $d\lambda$ で可視領域全域を積分しなければなりません、実用上は有限の波長幅 $\Delta\lambda$ (今回は10 nm)の総和で置き換えてもかまいません。そうすると残りの計算は簡単であり、表の6列目と7列目に詳細を示します。

例に取り上げたセンサ(CFA付き)を3200Kの光源で照らしたときの青チャネルの光度測定感度は次のようになります。

$$R_v = \frac{100 \times 2.78 \times 10^4}{4.12 \times 10^6} = 0.675 \text{ V lux}^{-1} \text{ sec}^{-1} \quad (\text{eq. 14})$$

注： 上式の係数100は、 μJ を W に、 m^2 を cm^2 に変換した結果です。

同様に、緑チャネルの感度は $1.4 \text{ V lux}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ 、赤チャネルの感度は $3.45 \text{ V lux}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ です。

ここまでの演習でわかったように、光学システムのスループット、光源のスペクトル放射輝度、フィルタ・ガラスの透過率、センサの感度など、あらゆるシステム・パラメータを熟知していないと、放射測定単位から光度測定単位への変換はできません。

Table 2. VALUES OF SPECTRAL RADIANCE AND FILTER GLASS TRANSMISSION USED TO CALCULATE LUMINOUS RESPONSIVITY FROM RADIOMETRIC RESPONSIVITY

Spectral Radiance						
Wavelength	Response $V \text{ mJ}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	3200 K Source $W \text{ cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$	BG-38 Transmission	Net Radiance	$L_{e\lambda} * R_\lambda$	$L_{e\lambda} * V(\lambda)$
360	0.03	7.42E+00	0.798	5.92E+00	1.75E-01	0.00E+00
370	0.09	9.06E+00	0.834	7.56E+00	6.85E-01	0.00E+00
380	0.39	1.09E+01	0.861	9.40E+00	3.64E+00	0.00E+00
390	1.17	1.30E+01	0.87	1.13E+01	1.33E+01	1.13E-03
400	2.48	1.53E+01	0.877	1.34E+01	3.32E+01	5.36E-03
410	4.26	1.78E+01	0.882	1.57E+01	6.67E+01	1.88E-02

Table 2. VALUES OF SPECTRAL RADIANCE AND FILTER GLASS TRANSMISSION USED TO CALCULATE LUMINOUS RESPONSIVITY FROM RADIOMETRIC RESPONSIVITY (continued)

Wavelength	Response V mJ ⁻¹ cm ⁻²	3200 K Source W cm ⁻² nm ⁻¹ sr ⁻¹	BG-38 Transmission	Net Radiance	L _{eλ} * R _λ	L _{eλ} * V(λ)
420	5.78	2.04E+01	0.886	1.81E+01	1.05E+02	7.24E-02
430	7.1	2.33E+01	0.891	2.08E+01	1.47E+02	2.41E-01
440	8.29	2.63E+01	0.893	2.35E+01	1.95E+02	5.41E-01
450	9.18	2.95E+01	0.897	2.65E+01	2.43E+02	1.01E+00
460	9.41	3.29E+01	0.899	2.96E+01	2.78E+02	1.77E+00
...						
700	0.11	1.15E+02	0.224	2.58E+01	2.84E+00	1.06E-01
710	0.37	1.18E+02	0.187	2.20E+01	8.16E+00	4.61E-02
720	1.23	1.20E+02	0.155	1.85E+01	2.27E+01	1.85E-02
730	3.19	1.22E+02	0.128	1.56E+01	4.97E+01	7.79E-03
740	6.57	1.24E+02	0.106	1.31E+01	8.61E+01	3.93E-03
750	10.22	1.25E+02	0.087	1.09E+01	1.11E+02	1.09E-03
760	14.22	1.27E+02	0.072	9.14E+00	1.30E+02	9.14E-04

Notes:

1. $K_m \sum_{\lambda=360}^{760} L_{e\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda = 4.12 \times 10^6$, where $K_m = 683 \frac{\text{lumens}}{\text{W}}$ from Equation 4.
2. $\sum_{\lambda=360}^{760} L_{e\lambda} R_{e\lambda} \Delta\lambda = 2.78 \times 10^4$.

Blackbody Radiance Curves

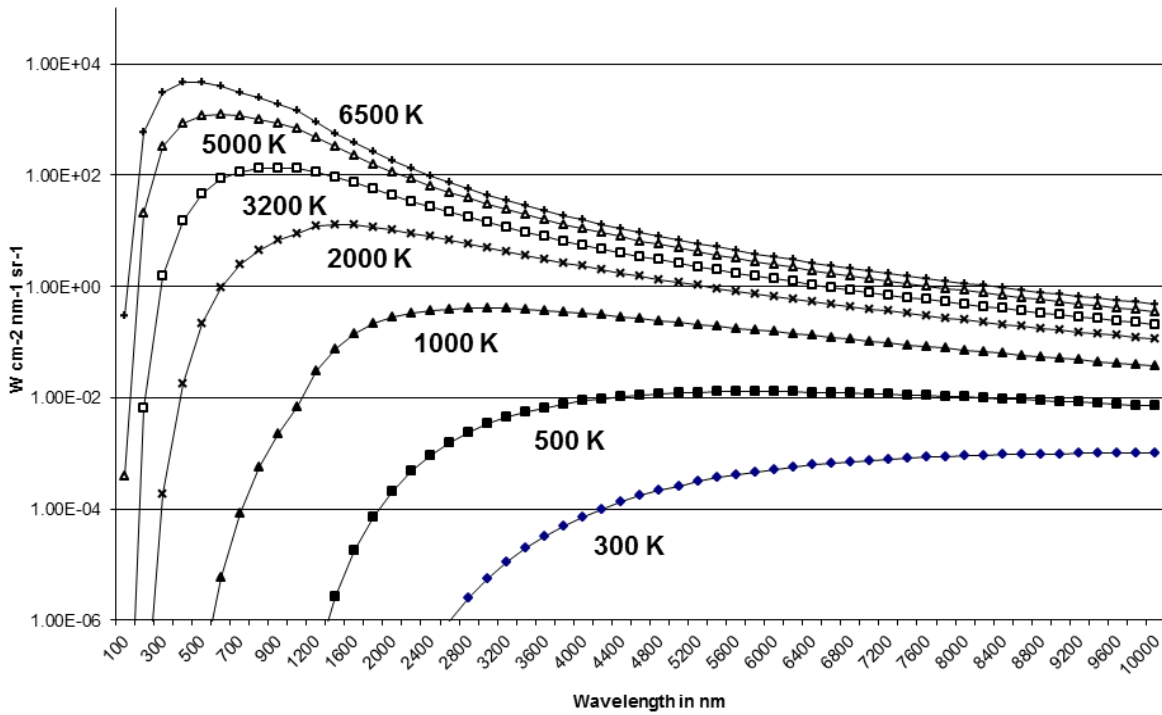


Figure 2. Blackbody Radiation Curves for Various Source Color Temperatures, Calculated from Planck's Law

付録I

Table 3. FUNDAMENTAL RADIOMETRIC AND PHOTOMETRIC QUANTITIES

Fundamental Radiometric Quantities			Fundamental Photometric Quantities		
Quantity	Symbol	Units	Quantity	Symbol	Units
Radiant Energy	Qe	J (joule)	Luminous Energy	Qv	lm s
Radiant Energy Density	we	J m ⁻³	Luminous Energy Density	Wv	lm s m ⁻³
Radiant Power or Flux	φe	W (watt)	Luminous Flux	φv	lm
Radiant Exitance	Me	W m ⁻²	Luminous Exitance	Mv	lm m ⁻²
Irradiance	Ee	W m ⁻²	Illuminance	Ev	lm m ⁻²
Radiant Intensity	Ie	W sr ⁻¹	Luminous Intensity	Iv	cd = lm sr ⁻¹
Radiance	Le	W m ⁻² sr ⁻¹	Luminance	Lv	cd m ⁻²
Emissivity	ε	-	Luminous Efficacy	K	lm W ⁻¹
			Photopic Luminous Efficiency	V(λ)	-
			Maximum Spectral luminous Efficacy	Km	lm W ⁻¹

参考文献

- [1] “The Basis of Physical Photometry”, 2nd ed., Commission Internationale de L'Eclairage Publ. No. 18.2, Central Bureau of the CIE, Vienna, 1983.
- [2] R. W. Boyd, *Radiometry and the Detection of Optical Radiation*, Wiley, New York, 1983.
- [3] F. Grum and R. J. Becherer, *Optical Radiation Measurements*, Academic Press, New York, 1979.
- [4] F. Hengstberger, ed., *Absolute Radiometry*, Academic Press, New York, 1989.
- [5] J. W. T. Walsh, *Photometry*, Dover, New York, 1958.
- [6] W. L. Wolfe, *Introduction to Radiometry*, SPIE Optical Press, Washington, 1998.

ON Semiconductor及びON SemiconductorのロゴはON Semiconductorという商号を使うSemiconductor Components Industries, LLC 若しくはその子会社の米国及び/または他の国における商標です。ON Semiconductorは特許、商標、著作権、トレードシークレット(営業秘密)と他の知的所有権に対する権利を保有します。ON Semiconductorの製品/特許の適用対象リストについては、以下のリンクからご覧いただけます。www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf。ON Semiconductorは通告なしで、本書記載の製品の変更を行うことがあります。ON Semiconductorは、いかなる特定の目的での製品の適合性について保証しておらず、また、お客様の製品において回路の応用や使用から生じた責任、特に、直接的、間接的、偶発的な損害など一切の損害に対して、いかなる責任も負うことはできません。お客様は、ON Semiconductorによって提供されたサポートやアプリケーション情報の如何にかかわらず、すべての法令、規制、安全性の要求あるいは標準の遵守を含む、ON Semiconductor製品を使用したお客様の製品とアプリケーションについて一切の責任を負うものとします。ON Semiconductorデータシートや仕様書に示される可能性のある「標準的」パラメータは、アプリケーションによっては異なることもあり、実際の性能も時間の経過により変化する可能性があります。「標準的」パラメータを含むすべての動作パラメータは、ご使用になるアプリケーションに応じて、お客様の専門技術者において十分検証されるようお願い致します。ON Semiconductorは、その特許権やその他の権利の下、いかなるライセンスも許諾しません。ON Semiconductor製品は、生命維持装置や、いかなるFDA (米国食品医薬品局)クラス3の医療機器、FDAが管轄しない地域において同一もしくは類似のものと分類される医療機器、あるいは、人体への移植を対象とした機器における重要部品などへの使用を意図した設計はされておらず、また、これらを使用対象としておりません。お客様が、このような意図されたものではない、許可されていないアプリケーション用にON Semiconductor製品を購入または使用した場合、たとえ、ON Semiconductorがその部品の設計または製造に関して過失があったと主張されたとしても、そのような意図せぬ使用、また未許可の使用に関連した死傷等から、直接、又は間接的に生じるすべてのクレーム、費用、損害、経費、および弁護士料などを、お客様の責任において補償をお願いいたします。また、ON Semiconductorとその役員、従業員、子会社、関連会社、代理店に対して、いかなる損害も与えないものとします。ON Semiconductorは雇用機会均等/差別撤廃雇用主です。この資料は適用されるあらゆる著作権法の対象となっており、いかなる方法によっても再販することはできません。

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
19521 E. 32nd Pkwy, Aurora, Colorado 80011 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative