

■12 群（電子情報通信基礎） - 6 編（測定）

4 章 光測定

（執筆者：市野善朗）[2011 年 4 月 受領]

■概要■

情報通信技術分野，電子材料・デバイス技術分野において，光（ここでは紫外域から可視，赤外域の光を対象とする）の測定の必要性は極めて高く，そのアプリケーションは多岐に渡っている。

光通信分野では，光伝送路の試験を行う際，基本的パラメータの一つである光減衰量を測定するために，光パワーメータ（テストメータ）が用いられている。光減衰量測定においては 10 桁以上にも及ぶ広ダイナミックレンジの光パワー測定が必要であり，この範囲において光測定器の応答直線性が適正に評価されていることが重要である。また光波長多重通信において，光波長の高密度化が進むに従い，光周波数の精密測定に基づく品質管理の重要性が増している。

画像情報出力装置（ディスプレイなど）においては，3D 画像表示機能や LED バックライトを搭載したディスプレイの急速な普及に象徴されるように，入力した画像情報のよりリアルな再現が求められており，その性能評価において高精度な光測定が必要となる。ディスプレイの重要なパラメータである輝度及びコントラストは，人間の眼の分光感度（分光視感効率）に近似した感度特性を持つ輝度計によって測定される。輝度は，国際単位系の基本単位の一つである光度（カンデラ）と同様，視覚刺激を物理測定によって定量化した心理物理量である。一方もう一つの重要な要素である色の測定は，分光放射計や色彩輝度計などの光測定器（測色器）を用いて測定される。ディスプレイ表示やプリンタ出力に対して，対象物の色をあるがままに再現することが強く求められるアプリケーションにおいては，標準光源や標準検出器，標準物体（標準白色板など）に基づいて適正に校正された光測定器による高精度な色測定が品質管理の鍵を握る。

光デバイスの技術革新は，上述の情報通信技術を支える基幹技術として，その発展に不可欠なものとなっている。光伝送用波長可変光源や携帯型プロジェクタ用光源，双方向通信用発光・受光素子など，様々なデバイス開発現場においては，信頼性の高い光パワー測定が求められている。光パワー測定器の基本構成要素である半導体受光素子（フォトダイオード）もまたこういった光デバイスの一つであり，応答直線性，偏光特性，波長依存性などの諸性能は，いずれも測定結果の信頼性を左右する重要な要素となっている。

本章では光測定の基本原理と測定装置の校正方法，及び関連する計量標準について述べる。

【本章の構成】

4-1 節では，測光量の定義（4-1-1），測光量と放射量の相関と単位（4-1-2），標準電球に基づく測光量測定方法（4-1-3），分光放射量絶対値を与える標準放射源及び比較測定方法（4-1-4），光検出器の感度測定（4-1-5），光コムを用いた光周波数絶対測定及び比較測定（4-1-6），測色の基本原理と物体色測定方法（4-1-7）について述べている。4-2 節では，連続発振レーザパワー測定及び標準実現方法（4-2-1），レーザパルスエネルギー測定及び標準実現方法（4-2-2），光減衰量測定のための光パワーメータ直線性校正方法（4-2-3）について述べている。

■12群 - 6編 - 4章

4-1 光の測定

4-1-1 測光量と放射量

(執筆者：齊藤一朗) [2008年10月受領]

光として取り扱う電磁波は、波長がおよそ1 nm から1 mm までの範囲にあるものである。ここでは従来からの用法に従って、単に放射とする。放射の強さに関する基本的な量は放射束であり、ほかのいろいろな放射量は放射束と幾何学的な量(面積, 立体角など)及び時間との組合せによって定義される。

SIの基本単位の一つである光度の現在の定義は、1979年の第16回国際度量衡総会で採択され「カンデラは、周波数 540×10^{12} Hzの単色放射を放出し所定方向におけるその放射強度が1/683 ワット毎ステラジアンである光源の、その方向における光度である」である¹⁾。これは、波長約555 nm(標準空気中の波長: 555.016 nm)の単色放射に対する放射量より導かれることを意味する。555 nm以外の波長あるいは広い波長分布をもつ光源の光度を求めるには、国際照明委員会(CIE)が、物理測光に用いることを目的に、明所視における人間の目の分光感度を基に標準化・規格化した分光視感効率 $V(\lambda)$ を併用する(図4・1)。

測光量と放射量の関係は、測光量は人間の目の感度に相当する分光視感効率 $V(\lambda)$ というフィルタをかけた放射束 Φ_e の測定と考えられる²⁾。

実際に測定される量は、人間の視感波長領域360~830 nmについて積分した、

$$F = K_m \int_{360nm}^{830nm} V(\lambda) \phi_e d\lambda$$
$$K_m = 683lm \cdot W^{-1} \quad \phi_e = \text{放射束 (単位: W)}$$

という量で、この量を光束と呼び、すべての測光量の基本となる。量としては光束が基本であるが、単位としては光度が基本となっている。

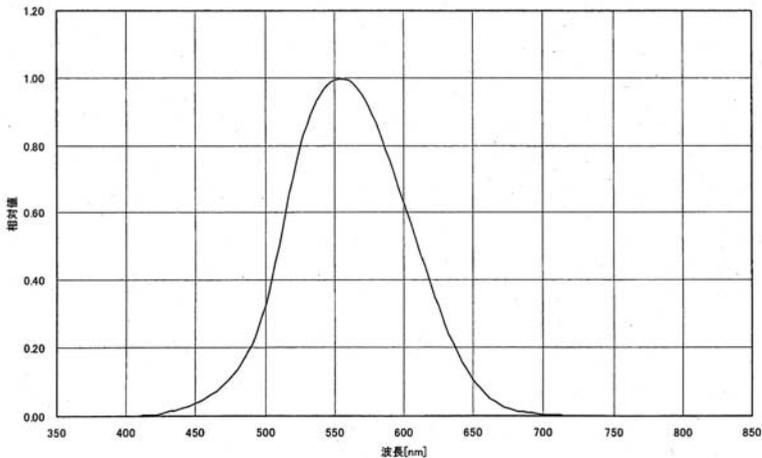


図4・1 分光視感効率 $V(\lambda)$

■参考文献

- 1) 日本規格協会, “国際単位系 (SI) 国際文書第 8 版 (2006) /日本語版”
- 2) ISO/CIE 23539:2005, “Photometry-The CIE system of physical photometry”

4-1-2 光放射に関する量と単位

(執筆者: 齊藤一朗) [2008年10月受領]

光放射に関する量には、測光量と放射量がある。測光量は放射量に国際照明委員会 (CIE) が、物理測光に用いることを目的として定めた、明所視における人間の目の感度に相当する分光視感効率 ($V(\lambda)$, 本章 4-1-1 節参照) というフィルタをかけた量であり、固有の単位名称と単位記号をもつ。測光量と放射量の相関を表 4・1 に示す。

光放射で用いられる国際単位系¹⁾は、以下の3種類に分類できる。

1) SI 基本単位

光度

2) 基本単位を用いて表される一貫性のある SI 組立単位

輝度

3) 固有の名称と記号で表される一貫性のある SI 組立単位

放射束, 放射照度, 光束, 照度, 立体角

この単位のほかに検出器の応答度として、検出器へ入射する放射 [W] と検出器の出力 [V もしくは A] との関係から、V/W または A/W が用いられる。放射量を波長の観点から見ると、ある波長帯域全般の放射量を評価する量 (名称の前に“全”をつける。例えば“全放射照度”) と分光的に特定の波長に対応した量に分類することができる。

表 4・1 測光量と放射量の相関

測 光 量			放 射 量		
量	名 称	記号	量	名 称	記 号
光度 ^{*1}	カンデラ	cd	放射強度 ^{*5}	ワット毎ステラジアン	W/sr
光束 ^{*3}	ルーメン	lm	放射束 ^{*3}	ワット	W
照度 ^{*3}	ルクス	lx	放射照度 ^{*4}	ワット毎平方メートル	W m ⁻²
輝度 ^{*2}	カンデラ毎 平方メートル	cd/m ²	放射輝度 ^{*5}	ワット毎平方メートル 毎ステラジアン	W m ⁻² /sr
立体角 ^{*3}	ステラジアン	sr			

*1 基本単位

*2 基本単位を用いて表現される SI 組立単位

*3 固有の名称をもつ SI 組立単位

*4 固有の名称を用いて表現される SI 組立単位

*5 固有の名称をもつ SI 組立単位を用いて表現される SI 組立単位

■参考文献

- 1) 日本規格協会, “国際単位系(SI)国際文書第 8 版 (2006) /日本語版”

4-1-3 測光量の測定

(執筆: 神門賢二) [2008年12月 受領]

測光量の測定は、標準電球または標準受光器(分光視感効率近似受光器: $V(\lambda)$ 受光器)を標準として比較する置換測定を基本原理としている。この比較測定は同種類の測光量間の比較を原則としているが、例えば光度標準電球から照度を測定する場合は、距離の逆二乗則を適用して標準電球から一定の距離の照度($V(\lambda)$ 受光器の照度応答度)を求め、それを標準値として試験光源の照度を測定することができる。このように測光量相互の間には簡単な関係が成り立つため、距離(光度から照度への変換)や面積(照度から光束への変換)などのほかの量を導入することにより各測光量を測定することができる。本項では代表的な測光量である光度と照度について光度標準電球(以下、標準電球)を用いて測定する方法に関して説明する。ほかの測光量の測定方法は参考文献1,2)などを参考されたい。

図4・2は、光度・照度校正の一般的な模式図を示す。試験光源の光度・照度を標準電球を用いて測定するには測光ベンチ、電球位置調整ステージ、 $V(\lambda)$ 受光器、距離測定のためのスケール、遮光板などの装置・器具類が必要である。標準電球との比較校正では $V(\lambda)$ 受光器は単なる比較測定のための仲介器となるため長期間の安定性は必要としない。また標準電球には校正値を与える点灯電圧と分布温度が与えられている必要がある。

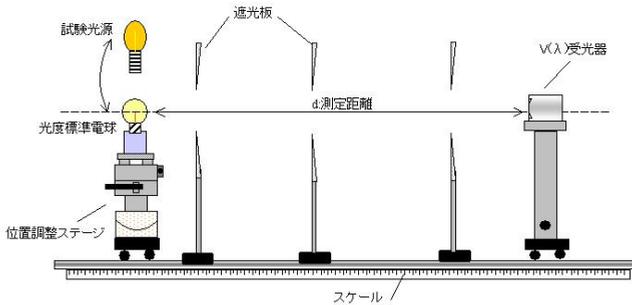


図4・2 光度・照度測定模式図

測定手順としては往復測定を用いるのが一般的である。例えば二つの標準電球(標準A、標準B)を用いて二つの試験光源(テストC、テストD)を測定する場合には、

“標準A⇒標準B⇒テストC⇒テストD⇒テストD⇒テストC⇒標準B⇒標準A”

のような手順で測定し、光源ごとに2回の測定の平均値を測定値として利用する。

光度測定では標準電球及び試験光源を $V(\lambda)$ 受光器から十分点光源とみなせる同一距離に設置し、それぞれを点灯したときの $V(\lambda)$ 受光器の読み値の比により試験光源の光度を求める。

$$I_t = \frac{i_t}{i_s} I_s \quad (4 \cdot 1)$$

ここに、 I_t は試験光源の光度、 I_s は標準電球の光度、 i_t は試験光源点灯時の $V(\lambda)$ 受光器の読み値、 i_s は標準光源の $V(\lambda)$ 受光器点灯時の読み値である。

ただし、分光視感効率³⁾に完全に一致している $V(\lambda)$ 受光器は存在しないため、標準電球の

分光分布と試験光源の分光分布が異なるときには、色補正係数を測定値に掛けて補正する必要がある。

$$K = \frac{\int P_s(\lambda)s(\lambda)d\lambda \cdot \int P_t(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int P_t(\lambda)s(\lambda)d\lambda \cdot \int P_s(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad (4 \cdot 2)$$

ここに、 $V(\lambda)$ は分光視感効率、 $P_s(\lambda)$ 及び $P_t(\lambda)$ はそれぞれ試験光源、標準電球の相対分光分布（標準電球の分光分布は一般に分布温度により決定される）、 $s(\lambda)$ は $V(\lambda)$ 受光器の相対分光応答度である。これにより、式(4・1)は、

$$I_t = K \cdot \frac{i_t}{i_s} I_s \quad (4 \cdot 3)$$

となる。

照度の測定は、光度と照度に成り立つ距離の逆二乗則：

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (4 \cdot 4)$$

の関係を用いて行う。ここに、 E は照度、 I は光度、 d は図4・2に示した光源から受光器までの測定距離である。この関係により、式(4・3)により試験光源の光度を求め、ある測定距離 d における測定面上の照度を算出することができる。ただし、一般には標準電球を用いて光源の照度を測定することはほとんどなく、照度計の目盛り値校正（照度応答度校正）に用いるのが一般的である。この場合は図4・2の $V(\lambda)$ 受光器の位置に試験照度計が設置される。設置時に注意することとして、照度計の距離の基準面の問題がある。取り扱い説明書や機器本体に記してある距離の基準面は、便宜的に受光の面の一番前に設置してある場合が多い。このため距離の逆二乗則がすべての距離で成立する真の基準面と一致するとは限らない。一般的にこの不一致は測定距離が3 m以上ではほとんど問題にならない場合が多いが、注意する必要がある。真の基準面測定方法を含めて照度計の詳しい試験方法などに関しては、参考文献4)などを参考にされたい。

■参考文献

- 1) 社団法人照明学会編，“光の計測マニュアル，”日本理工出版会，1990。
- 2) Casimer DeCusatis，“Handbook of Applied Photometry，”AIP PRESS，1997。
- 3) 国際照明委員会編，“No 18.2 The basis of physical photometry, 2nd ed.,”CIE Publ, 1983。
- 4) JIS C 1609，“照度計，”日本規格協会，2006。

4-1-4 放射源の測定

(執筆者：座間達也) [2009年3月 受領]

光の明るさに関する量には測光量（人間の目の視感度に応じて明るさを定量化したもの）及び放射量（単位時間当たりの放射エネルギー、つまり放射束〔W〕により明るさを定量化したもの）がある。放射量である放射束〔W〕は最も基本的な単位であり、すべての測光量、放射量は、この放射束〔W〕から組み立てられる。

放射束〔W〕の絶対値は、基本的な標準、例えば電気量の標準である電圧と抵抗から組み上げられる電力〔W〕との比較を行うことにより決定されるが、このためには外部から入射してくる放射と、外部から入力される電力の等価性が担保できるような機能をもつ熱型検出

器が利用される。このような熱型検出器を上位に各種検出器の応答度（出力信号／入射放射束〔W〕）が評価される。

放射源が完全単色光源である場合を除き、放射源からの放射束〔W〕は波長軸に対して広がりをもっており、放射の分光分布を規定するには、放射束〔W〕ではなく波長微分された次元をもつ分光放射束〔W nm⁻¹〕を導入する必要がある。しかしながら、検出器で評価可能な量はあくまでも放射束〔W〕であり、次元が異なるうえ、適当なフィルタ、分光器などで、ある波長周辺の放射束にかかわる情報を得ることができても、その情報は、分光放射束〔W nm⁻¹〕のみならず、フィルタ、分光器などに起因する波特性（透過帯域幅、透過窓関数の形状）の関数でもあり、当該情報から分光放射束〔W nm⁻¹〕を逆算することは困難かつ実質的にほぼ不可能である。

他方、分光放射束〔W nm⁻¹〕の絶対値を与える放射源はいくつか知られており、黒体、シンクロトロン放射などがこれに当たる。このような背景から、測光量、放射量の分野では、通常、絶対値の評価にあたって、絶対放射束〔W〕の評価が可能な標準検出器（出力信号／入射放射束〔W〕で表される応答度が評価された検出器）、及び、分光放射束〔W nm⁻¹〕の絶対値を与える標準放射源、の両者が併用される。

以下では後者の、“分光放射束〔W nm⁻¹〕の絶対値を与える標準放射源”及びこれを用いた比較測定技術について概説する。

(1) 標準放射源

黒体は主に紫外・可視・赤外域の標準放射源として用いられ、その分光放射束（厳密には分光放射輝度〔W nm⁻¹ sr⁻¹ m⁻²〕）は以下のような Planck の放射式より導かれる。

$$L_{e,B}(\lambda) = \frac{2hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

上式において $L_{e,B}$ は分光放射輝度、 h は Planck 定数、 c は光速、 k はボルツマン定数、 λ は波長、 T は黒体の温度である。上式より分かるとおり、黒体温度の絶対値を決定すれば、黒体を分光放射束〔W nm⁻¹〕の絶対標準放射源とすることが可能である。

紫外・可視・赤外域の放射源として用いるためには、2000 K 以上の黒体温度が必要で、黒体温度の決定に接触型の温度測定は利用できない。よって、黒体温度の絶対値決定に際しては、一定の絶対温度で動作可能な黒体炉（定黒体炉と呼ばれる。融点等が判明している物質を用いた黒体炉で、この融点等の温度での定温動作が可能）と上記黒体炉の分光放射束を比較するか、バンドパスフィルタなどで一部の波長周辺の黒体放射を切り出し、その際の放射束〔W〕を前出の標準検出器で評価して、プランクの放射式から黒体温度の絶対値を逆算する手法が用いられる^{1,2)}。

シンクロトロン放射は主に紫外・真空紫外の標準放射源として用いられ、その分光放射束〔W nm⁻¹〕は以下のような式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{d^2\Phi}{d\theta d\psi} &= \frac{d^2\Phi_{\parallel}}{d\theta d\psi} + \frac{d^2\Phi_{\perp}}{d\theta d\psi} \\ &= \frac{eIR^2}{3\pi\epsilon_0\gamma^4\lambda^3} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \left\{ \left(1 + (\gamma\psi)^2\right)^2 K_{2/3}^2(\xi) + \left(1 + (\gamma\psi)^2\right)(\gamma\psi)^2 K_{1/3}^2(\xi) \right\} \\ \left(\gamma &= \frac{E}{m_0c^2}, \quad \xi = \frac{\lambda}{2\lambda_c} \left\{1 + (\gamma\psi)^2\right\}^{3/2}, \quad R = \frac{E}{ecB}, \quad \lambda_c = \frac{4\pi R}{3\gamma^3} \right) \end{aligned}$$

上式において、 Φ はシンクロトロン放射の分光放射束〔W nm⁻¹〕、 Φ_{\perp} は軌道面に垂直な電場ベクトルをもつ放射束、 Φ_{\parallel} は軌道面に水平な電場ベクトルをもつ放射束、 E は電子エネルギー、 m_0 は電子質量、 e は素電荷、 I は蓄積電子による電流、 c は光速、 B は偏向磁場の値、 R は電子の回転半径、 λ は波長、 K は第二種ベッセル関数、 Ψ は軌道面から鉛直方向の角度、 θ は水平方向の角度である。これらのパラメータを決定すれば、シンクロトロン放射を分光放射束〔W nm⁻¹〕の絶対標準放射源とすることが可能である^{3,4)}。図4・3に黒体放射及びシンクロトロン放射の分光放射束の一例を示す。

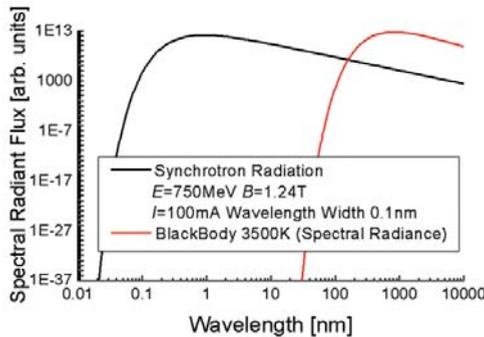


図4・3 黒体放射及びシンクロトロン放射の分光放射束の一例

上記の黒体、シンクロトロン放射とも可搬性に劣るのが難点である。実現された絶対分光放射束〔W nm⁻¹〕を利用しやすくするには、この絶対分光放射束〔W nm⁻¹〕を用いて、可搬性が良好な小型光源からの放射の絶対分光放射束〔W nm⁻¹〕を決定する必要がある。以下ではこの決定手法に関して概説する。

(2) 比較測定技術

小型光源からの放射の絶対分光放射束〔W nm⁻¹〕決定に際しては、出射スリットの後ろに検出器をもつ分光器などが用いられる（ただし、分光器に限らず、ある中心波長周辺のみ放射を切り出し、切り出した後の放射の強さを信号に変換できる機能をもつとともに、中心波長自体を自在に変更できる機能を所持する装置であればいずれでもよい）。この分光器に黒体あるいはシンクロトロン放射と、小型光源からの放射の各々を交互に入射し、検出器信号を比較すれば、以下のような関係式より、小型光源からの放射の絶対分光放射束〔W nm⁻¹〕が決定できる。

$$\Phi_{TS}(\lambda) = \frac{R_{TS}(\lambda)}{R_{PS}(\lambda)} \Phi_{PS}(\lambda)$$

上式において、 Φ_{PS} は黒体またはシンクロトロン放射の絶対分光放射束 [W nm⁻¹]、 Φ_{TS} は小型光源からの放射の分光放射束 [W nm⁻¹]、 R_{PS} は黒体またはシンクロトロン放射からの放射を分光器に入射した際に測定された検出器信号、 R_{TS} は小型光源からの放射を分光器に入射した際に測定された検出器信号である。

ただし上述のとおり、分光器などである波長周辺の放射束にかかわる情報を得ることができても、その情報は、分光放射束 [W nm⁻¹] のみならず、分光器に起因するろ波特性 (透過帯域幅、透過窓関数の形状) の関数でもある。そのため、上式が厳密に成立するのは、黒体またはシンクロトロン放射の分光放射束と小型光源からの放射の分光放射束が比例する (黒体またはシンクロトロン放射の分光放射束と小型光源からの放射の分光分布が等しい) 場合に限られる。特に標準放射源と比較対象の光源の分光分布、偏光特性が異なる場合、分光器等波長分散素子に起因するろ波特性 (透過帯域幅、透過窓関数の形状)、偏光特性を考慮したうえでの補正、不確かさ評価が重要となる^{5,6)}。

■参考文献

- 1) Suzuki, M. and Ooba, N, "International Intercomparison of Spectral Irradiance Scales.," Metrologia, vol.12, pp.123-128, 1976.
- 2) Walker, J.H. Saunders R.D. Jackson, J.K. and Mielenz, K.D, "Results of CCPR Intercomparison of Spectral Irradiance Measurements by National Laboratories.," Res. Natl. Inst. Stand. Technol., vol.96, pp.647-667, 1991.
- 3) Schwinger, J., "On the Classical Radiation of Accelerated Electrons.," Phys. Rev, vol.75, pp.1912-1925, 1949.
- 4) Zama, T., Saito, T. and Onuki H, "Beamline for calibration of transfer standard light sources in the UV and VUV regions.," J. Synchrotron Radiation, vol.5, pp.759-761, 1998.
- 5) ZAMA, T and SAITO, I, "Determining the temperature of a blackbody based on a spectral comparison with a fixed temperature blackbody.," Proceedings of the 9th International Conference on New Developments and Application in Optical Radiometry, pp.281-282, 2005.
- 6) ZAMA, T and SAITO, I, "Calibration of absolute spectral radiance in UV and VUV regions by using synchrotron radiation.," J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., vol.144-147, pp.1087-1091, 2005.

4-1-5 検出器の測定

(執筆者: 齋藤輝文) [2009年1月受領]

光検出器のいわゆる感度を表す定義には、次の2種類がある。一つは分光応答度 (分光感度ともいう) s であり、光検出器へ入射する単位パワー当たりの光検出器の出力として定義される。もう一つは分光量子効率 η であり、光検出器へ入射する1個の光子当たりの光検出器の出力電荷 (対) の数で定義される。

分光応答度が s [AW⁻¹] であるフォトダイオードへ波長 λ [nm] の単色放射を入射させたときの光電流が i [A] である場合、その放射束 P [W] は、 $P=i/s$ で、光子束 Φ [s⁻¹] は、 $\Phi=i/(e\eta)=\lambda i/(hcs)$ で与えられる (e :電子の素電荷、 h :プランク定数、 c :真空中の光速)。 s と η は次の関係式で結ばれる。

$$s = \frac{e\lambda\eta}{hc} \approx \frac{\lambda\eta}{1240}$$

フォトダイオードのような量子型検出器では波長によらず、内部分光量子効率が一定 (理想的には1¹⁾) となるのに対し、サーモパイル検出器のような熱型検出器では、内部分光応答

度が一定となる。したがって、入射光の分光分布によらず、一般に量子型検出器では光子束を、熱型検出器では放射束を測定するという違いがあることに留意する必要がある。

光検出器を使用するときに配慮すべき事項には、1) 不安定性²⁾、2) 非直線性³⁾、3) 面内不均一性、4) 温度依存性、5) 測定光学系、検出器の偏光依存性⁴⁾、6) 入射ビーム発散角依存性⁵⁾、7) スペクトル幅依存性、8) 迷光による寄与、9) 光電子放出⁶⁾・蛍光による寄与などがある。これらのほとんどすべてが入射光の波長依存性をもつので、使用波長で評価することが重要である。一般に、不安定性、不均一性、偏光依存性、発散角依存性は、吸収の強い紫外域で顕著となり、非直線性、不均一性、温度依存性は、吸収の弱い赤外吸収端付近で顕著となる傾向がある。Si フォトダイオードの偏光依存性については、可視域で p 偏光に対する感度が s 偏光に対する感度よりも大きくなるが、紫外域では一部逆転し、かつ強い波長依存性及び SiO₂ 膜厚依存性をもつ。光電子放出が起こる真空紫外域の測定では、フォトダイオードに電流計をつなぐ極性の違いにより、その光電流の絶対値に差が生じうる。光電子放出電流の寄与を避けるには、受光面側の電極を接地すべきである。

■参考文献

- 1) E.F. Zalewski and J. Geist, "Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration," *Appl. Opt.* vol.19, pp.1214-1216, 1980.
- 2) R. Korde, C. Prince, D. Cunningham, R.E. Vest and E. Gullikson, "Present status of radiometric quality silicon photodiodes," *Metrologia* vol.40, pp.S145-S149, 2003.
- 3) H.J. Jung, "Spectral nonlinearity characteristics of low noise silicon detectors and their application to accurate measurements of radiant flux ratios," *Metrologia* vol.15, pp.173-181, 1979.
- 4) T. Saito and H. Onuki, "Polarization characteristics of semiconductor photodiodes," *Metrologia* vol.32, pp.485-489, 1996.
- 5) T. Saito and H. Onuki, "Difference in silicon photodiode response between collimated and divergent beams," *Metrologia* vol.37, pp.493-496, 2000.
- 6) T. Saito, "Difference in the photocurrent of semiconductor photodiodes depending on the polarity of current measurement through a contribution from the photoemission current," *Metrologia* vol.40, pp.S159-S162, 2003.

4-1-6 光周波数測定

(執筆者：稲葉 肇) [2009年2月受領]

光の速さは、その周波数と波長の積である。波長(周波数)安定化レーザーの発明以降、マイクロ波帯の周波数標準を基準として光周波数を計測することは、古くは光の速さの測定のために必要なテーマであり、光の速さが定義となった現在では、波長(長さ：メートル)の定義の実現のために必要な技術である。しかしながら、可視～近赤外光の周波数は、数百 THz と高いため、直接電気信号に変換する受光器はなく、信号を処理する電気的素子もない。光の周波数を計るためには、電気的に扱える周波数まで分解する必要がある。周波数を分解する方法として、近い周波数を混ぜると発生するうなりを利用して差周波数を検出する「ビート」、周波数を整数倍にする「通倍」と、整数分の一に割る「分周」などがあり、基本的に周波数計測とは、周波数の加減乗除によって基準周波数と比較することである。1999年頃までは、レーザーの周波数を測定する装置として、「周波数チェイン」^{1,2)}が用いられていた。これはセシウム周波数(約 9.2 GHz)を基点として、通倍を基本に何段もの局部発振器を仲介させて光周波数を合成するものであった。その技術的難易度とコストの高さから、動作状態の周波数チェインを維持できていた機関はなく、断続的に測定を行っていたのもわずか数か国

のみであった。1990年代末にフェムト秒モード同期レーザの性能向上と共に、フォトニック結晶ファイバ（以下 PCF）という特殊な非線形ファイバが開発され、ドイツと米国のグループにより「光コム」を用いた光周波数絶対計測の提案がなされた^{3,4)}。これは標準をはじめとする多くの分野において極めて大きな技術革新であり、この成果により 2005 年のノーベル物理学賞が米 Hall 博士と独 Hänsch 博士に贈られたことは記憶に新しい。光周波数計測は 1 台のレーザと 1 人の研究者で扱える技術となり、世界の各研究機関が独自に光周波数計測を行うことが可能になった。更に、光周波数領域で周波数標準を実現しようという、それまでは絵に描いた餅だった「光時計」が現実味を帯び、現在世界中で熾烈な競争が繰り広げられている^{5,6)}。既にその周波数標準としての能力はセシウムによるマイクロ波周波数標準を超えているといわれており、ここ数年の間に秒の定義がマイクロ波周波数から光周波数に変わる可能性もある。

光パルスはそのパルスの時間幅が短くなってくるとスペクトルが広がってくる（フーリエ限界）。Ti:sapphire レーザの場合、1 fs くらいのパルス幅になると、スペクトル幅は可視域の半分に及ぶ。単発の光パルスのスペクトルは連続的に広がっており、スペクトルの端の方を抜き出して周波数を正確に測ることはできない。一方で、モード同期レーザが発するのは超短光パルスが一定時間間隔で並んだものである。このような光パルス列のスペクトルを観察すると、スペクトルの拡がり是不変だが、図 4・4 に示すようにモードが離散的に分布している。この姿が櫛（くし）に似ていることから光コム（comb）と呼ばれる。光コムの場合、全体のスペクトルの端の方であっても、そのモードを一本抜き出して周波数を正確に測ることが可能である。

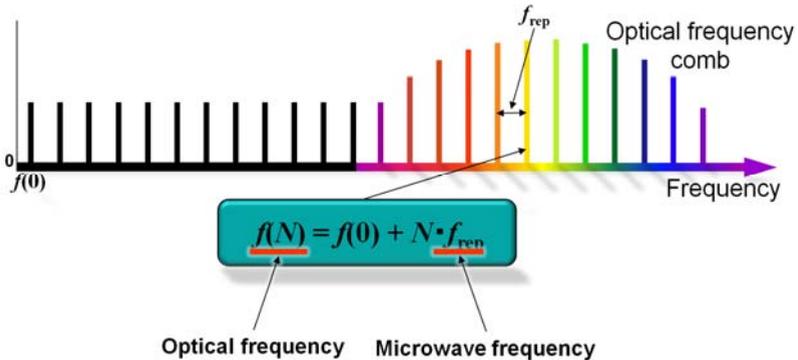


図 4・4 光コムのスペクトル：影のある線は実在する光コムのモード群で、そのほかは仮想的に拡張させたモード群

図 4・4 に示すように、光コムを仮想的にゼロ方向に延ばしたときの一番低い周波数 f_{CEO} はキャリア・オフセット・エンベロープ周波数と呼ばれる。これをゼロ番目のモードとしたとき、 N 番目のモードの周波数 $f(N)$ は $f(N) = f_{\text{CEO}} + Nf_{\text{rep}}$ と表すことができる。ここで f_{rep} はモード間隔周波数であり、モード同期レーザの繰り返し周波数に等しい。 N は数十万～数百万の整数であり、繰り返し周波数の高いモード同期レーザの場合は N が小さくなる。 f_{CEO} は相対

的には小さい周波数値であるが、その検出が光周波数とマイクロ波周波数を結ぶ鍵となる。そして f_{CEO} を検出するためには、光コムのスペクトルが広いことが重要であり、拡がり「1 オクターブ」を超えるとその検出が比較的簡単に行える。光コムの各モードは周波数間隔が等しいだけでなくその位相もそろっており、この式は厳密に成り立っている。 f_{CEO} を無視すれば、マイクロ波周波数である f_{rep} と光周波数である $f(N)$ が一意に整数倍の関係で結ばれていることが分かる。 f_{CEO} がゼロでなくともその一意性は変わらない。したがって、 f_{rep} と f_{CEO} を原子時計などの基準周波数に同期させることにより、原子時計の発生するマイクロ波周波数から合成された光周波数を発生させることができる。光コムの波長範囲は Ti:sapphire レーザと PCF の組合せにより発生させられた場合、可視域の大部分と近赤外域を含む 500~1100 nm におよび、回折格子などで分光すると虹のようなスペクトルを観察することができる。この虹は太陽光などによる虹と異なり、高い時間的コヒーレンスをもった発振モード群であり、何百万という単一周波数レーザがお互い位相同期して一定の周波数間隔で並んでいるのと似たものである。

前述したように、光コムの各モードの周波数 $f(N) = f_{\text{CEO}} + Nf_{\text{rep}}$ は、二つのマイクロ波周波数 f_{CEO} と f_{rep} とが原子時計などに位相同期されると一意に決まる。したがって、光コムが存在する波長範囲の単一周波数レーザを、その発振周波数に一番近い N 番目のモードと合波して差周波数 f_{beat} を測定することにより、その単一周波数レーザの光周波数 f を $f = f_{\text{CEO}} + f_{\text{beat}} + Nf_{\text{rep}}$ から計算することができる。

光コムのもう一つ大きな機能は、光周波数どうしの比較が可能なことである。光コムが現れる以前には、光の周波数とマイクロ波周波数との比較が極めて困難だったことは前述したが、それ以上に光の周波数どうしの比較は困難であった。発振波長がごく近かったり、都合の良い和周波や差周波、及び第二高調波などが利用できたりするような幸運がなければ、比較された例は皆無であった。現在は、光コムが存在する周波数領域内であれば任意の光周波数の比較が可能である。光周波数どうしの比較では、マイクロ波周波数を経ずに直接比較することが可能である。すなわち、二つの光周波数は $f_1 = f_{\text{CEO}} + Nf_{\text{rep}} + f_{\text{beat1}}$ 及び、 $f_2 = f_{\text{CEO}} + Mf_{\text{rep}} + f_{\text{beat2}}$ で記述されるが、これらから f_{rep} を消去すると $\alpha f_1 - f_2 = \alpha(f_{\text{CEO}} + f_{\text{beat1}}) - (f_{\text{CEO}} + f_{\text{beat2}})$ となる。ここで α は二つの光周波数がそれぞれ相互作用する光コムの整数次数比 M/N である。この式に従って f_{CEO} 、 f_{beat1} 、及び f_{beat2} を信号処理すると、二つの光周波数のうち片方を波長変換して得られるビート $\alpha f_1 - f_2$ が観察できる⁷⁾。光周波数の比較においては f_{rep} の揺らぎの影響は打ち消され、高い周波数安定度での周波数比較が可能である。

■参考文献

- 1) Y. Miki et al., Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers **33**, 1655, 1994.
- 2) H. Schnatz et al., Physical Review Letters **76**, 18, 1996.
- 3) D. J. Jones et al., Science **288**, 635, 2000.
- 4) T. Udem et al., Optics Letters **24**, 881, 1999.
- 5) Z. W. Barber et al., Physical Review Letters **100**, 2008.
- 6) M. Takamoto et al., Nature **435**, 321, 2005.
- 7) J. Stenger et al., Physical Review Letters **88**, 2002.

4-1-7 色の測定

(執筆者： 蓜 洋司) [2009年2月]

色の測定(測色)とは、色の性質を物理的方法によって数値として表す測定のことであり、測色を通して得られる数値は、プリンタ・ディスプレイ・塗料・染料・写真・化成品・繊維・金属・医療診断などの幅広い分野において、様々な色管理手段として用いられている。また測色の対象は、自発光している光源の色(光源色)と、光源によって照射された物体の色(反射物体色または透過物体色)に大別される。

色は人間の知覚の一つであり、ある分光分布をもつ光(光源色の場合は光源から放射される光、物体色の場合は物体からの反射光または透過光)が人間の眼に入射すると、網膜上に存在する赤色・緑色・青色にそれぞれ応答をもつ3種類の錐体細胞に刺激が与えられ、神経節細胞での反対色応答処理などの複雑な過程を経て、脳に色情報として伝達されると考えられている。測色においてもその知覚原理の基本に基づいた計測が必要であり、現在ではXYZ表色系¹⁾(CIE1931表色系)が一般的に用いられている。XYZ表色系では、3種類の錐体細胞の応答に由来して得られる色刺激を、2°視野等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を定義²⁾すること(注：10°視野等色関数も定義されている)で、三刺激値X、Y、Zとして数値化している。ある分光分布 $P(\lambda)$ をもった光(厳密には放射束)を測定した場合、対応する三刺激値は、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} P(\lambda) \cdot \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

で与えられる。ここで、 k は規格化のための定数である。このようにして得られた三刺激値から色度座標(x, y)を求めることができ、更にほかの表色系への変換や色差の算出といった、色を表す様々な基本評価指標に加えて、複雑な視覚現象を考慮した、人間の色の見えを示す様々な評価軸が与えられる。上式において $P(\lambda)$ は、光源色の測定であれば測定対象となる光源の(相対)分光分布に相当し、物体色の場合では、その物体を照射する光源の(相対)分光分布に、観測対象となる物体の分光反射率 $\rho(\lambda)$ または分光透過率 $T(\lambda)$ を乗じたかたちで表される。

測色の方法には分光測色法と刺激値直読法があり、いずれの場合においても、先に述べた(相対)分光分布または分光反射率・分光透過率の情報(分光情報)を与える何らかの測定量が必要となる。分光測色法の場合では一般に、分光光学系と検出器から構成される分光測光器(測色器などと称されることが多い)によって必要とされる分光情報を求める。刺激値直読方法の場合には、分光応答度を等色関数に近似させた受光器(光電色計計 etc.)を用いて直接、三刺激値に対応した応答を得る。

このとき、これらの分光情報を求める方法として、(相対)分光分布が既知の標準光源、または分光反射率や分光透過率が既知の標準物体などを用いた、被測定対象との同一測定条件下での比較測定が一般的に行われる。また、受光器の分光応答度についても同様に、分光応答度が既知の標準検出器と被校正対象とを、同一条件で波長ごとに比較測定することで求めることができる。標準光源及び標準検出器の詳細と、それらを用いた分光分布や分光応答度の校正方法については、同章4-1-4節“放射源の測定”、4-1-5節“検出器の測定”をそれぞれ参照されたい。本項では、物体色測定について以下に記述する。

物体色測定は、反射物体色測定と透過物体色測定に大別される。反射物体色測定は厳密に

は、分光反射率係数・分光拡散反射率・分光放射輝度率などの種々の反射パラメータ測定に基づいて行われるものであるが、これらは特に混乱を生じない場合、分光反射率と総称されることが多い。同様に、透過物体色測定は、分光正透過率・分光透過率係数・分光拡散透過率・分光放射輝度率などの測定に基づく。いずれの場合も、拡散性の強い試料から、鏡面性や透明性の強い試料まで様々であり、測定対象となる物体の性質及び測定の目的に応じた適切な幾何条件及び標準物体の選定が重要である。一般に反射物体色では、均等拡散性を仮定できる拡散反射面が標準物体（標準白色板）として用いられる。この標準白色板には、絶対反射率測定にトレーサブルな分光反射率校正が行われていることが必要である。一方、透過物体色測定の基準としては、空気層を考えることが多い。図4・5に、反射物体色測定における代表的な幾何条件を示す。いずれの場合においても、各々の幾何条件において分光反射率が校正された標準白色板を用いて、試料との同一条件での比較測定によって、受光器からの応答の比に基づき、試料の分光反射率が求められ、この分光反射率と試料を照射する光源の(相対)分光分布の情報から、三刺激値を計算することができる。物体色測定では、照射光源として、標準化されたいくつかの基準イルミナントが用いられる場合が多い³⁾。また、図4・5の(3)と(4)では、半空間に広がる入射または反射状態を測定対象(条件)としており、積分球を用いた測定が必要となる。これらの測定では、積分球面上に設けた開閉(着脱)可能な開口部の利用によって、正反射成分の寄与の有無を選別した測定を行うことができる。

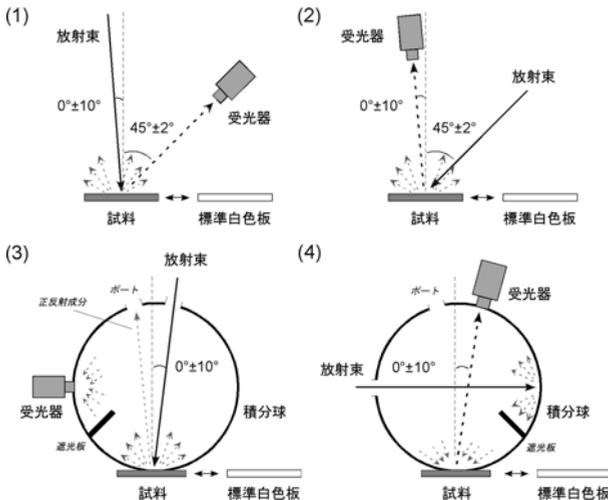


図4・5 反射物体色測定における代表的な幾何条件：(1) $0^\circ:45^\circ_x$, (2) $45^\circ:x:0^\circ$, (3) $8^\circ:de$, (4) $de:8^\circ$
※(3), (4)については、図中の積分球ポートを閉じることによって、正反射成分を含んだ測定幾何条件 ($8^\circ:di$ または $di:8^\circ$) となる

■参考文献

- 1) CIE 15:2004, Colorimetry, 3rd Edition, 2004.
- 2) ISO 10527/CIE S014-1, Colorimetry - Part 1: CIE Standard Colorimetric Observers, 2006.
- 3) ISO 10526/CIE S014-2, Colorimetry - Part 2: CIE Standard Illuminants, 2006.

■12群 - 6編 - 4章

4-2 レーザの測定

4-2-1 レーザパワーの測定

(執筆者: 遠藤道幸) [2009年1月 受領]

ここでは、主にレーザ発振器や光ファイバから出射されたビーム状の出力として、パワー[W]の測定を対象とする。

レーザパワーは、すべて光検出器に入射させて測定することが必要であり、検出器の受光径と入射されるビーム径の関係について考える。検出器の面感度偏差(受光面内の入射位置による出力信号の違いによる感度のむら)を考慮すると、受光径には対象となる入射ビーム径の適切な範囲がある。ビーム強度をガウス分布とし、その中心強度を I_0 、ビーム直径 (I_0 の $1/e$ となる直径) を $2w$ とすれば、中心からの距離 a に対し、強度分布(放射パワー密度) I の関係が求まる。これから、測定されるパワー P と全放射パワー P_0 の割合は、次式のように表すことができる。

$$\frac{P}{P_0} = 1 - \exp\left(-\frac{a^2}{w^2}\right) \quad (4 \cdot 6)$$

図4・6は、ガウスビーム測定に必要な検出器の直径 $2a$ と入射ビームの直径 $2w$ の関係を示す。 a が w と同じとき 63.2 %、2倍で 98.2 %、3倍でほぼ 100 % の受光となる。実際には、受光面の面感度偏差などを考慮したうえで位置合わせを容易にするため、受光径はビーム直径の3~5倍が望ましい。測定対象が高次モードのビームでは更に裾を引くため検出器の受光径は大きくする必要がある。

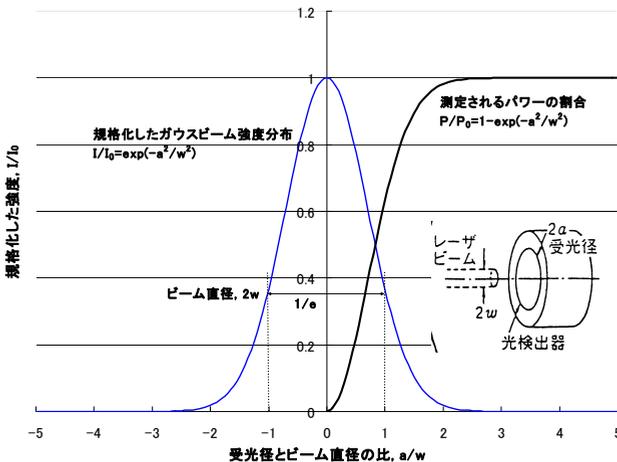
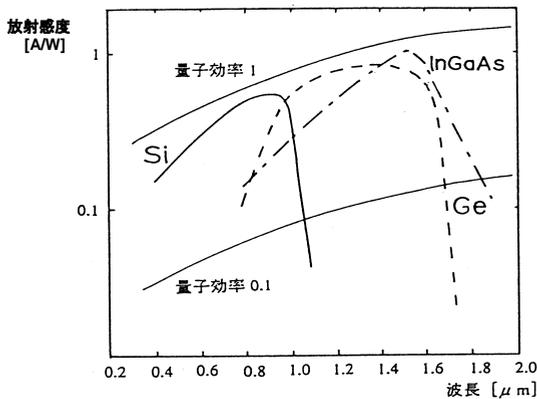


図4・6 ガウスビーム測定に必要な検出器の直径 $2a$ と入射ビームの直径 $2w$ の関係

レーザパワー測定の方法には、光電的、熱的、光化学的、非線形光学的及び機械的など種々の方法が考えられている。実用的には、光電的測定方法と熱的測定方法が重要である。光電

的測定方法は4-1節に述べられた光の測定と同様であるが、半導体のpn接合部での光起電力効果、半導体の光照射による抵抗変化を利用する光導電効果、光吸収により固体表面から真空中に放出される光電子を利用する外部光電効果に基づくものがある。中でも、光起電力効果に基づくフォトダイオードや太陽電池は感度が高く、その直線性も良いので、広く用いられている。光を吸収して電子を発生するために、フォトンエネルギーが受光素子材料の禁制帯以上であることが必要であり、使用する波長により結晶材料を選択する。例えば、波長0.45~0.9 μm でSi、波長0.9~1.6 μm でGeやInGaAsがよく用いられる。注意すべきは、感度の波長依存性と受光面内の感度偏差が大ききことである。一般的なフォトダイオードの波長対感度測定例と受光面内の感度偏差例を図4・7、4・8に示す。また、素子固有の反射、窓材の透過、反射特性が波長依存性をもつことを考慮すべきである。光電的測定方法は受光素子として用いられる半導体の感度の直線性により、一般に1 mW以下のレベルで使用される。光電的測定方法は熱的測定方法や標準放射源により特定の波長、レベルで校正され、波長特性データが付加されたもの、指示部に波長特性の校正値ロムが内蔵されたものが多く、測定の確度は $\pm 2\sim 5\%$ 程度である。



(*2-2) 放射感度の波長依存性

$$\begin{aligned}
 (\text{放射感度}) &= (\text{発生電流}) / (\text{入射電力}) \text{ [A/W]} \\
 &= (\text{単位時間当りの発生電荷}) / (\text{単位時間当りの入射エネルギー}) \\
 &= (\text{発生電子数} \times \text{電子電荷}) / (\text{入射光子数} \times \text{光子エネルギー}) \\
 &= [(\text{発生電子数}) / (\text{入射光子数})] \times [(\text{電子電荷}) / (\text{光子エネルギー})] \\
 &= (\text{量子効率}) \times (q / h\nu) = (\text{量子効率}) \times 0.806 \times \lambda (\mu\text{m})
 \end{aligned}$$

図4・7 フォトダイオードの波長対感度特性

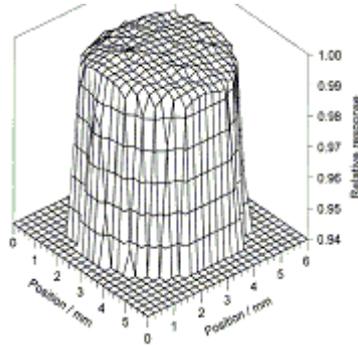


図 4-8 フォトダイオードの受光面内の感度偏差例

熱的測定方法は、レーザ光を吸収体に吸収させて熱に変換し、その温度上昇を直接測定するか、または間接的に吸熱による体積や圧力の変化として測定する方法である。実用的には前者が重要である。熱的測定方法は光電的測定方法に比べて波長や入射位置に対する依存性は少ないが、感度が低いので通常 0.1 mW 以上の測定に使用される。このタイプの特徴は、レーザ吸収体にヒータを埋め込み、既知の直流電力をヒータに印加することで吸収体の感度を校正する直流電力置換ができ測定精度を上げられることである。吸収体の裏面は多数の熱電対を直列に接続して出力電圧を高くした熱電堆（サーモパイル）と呼ばれるユニット化した熱型センサを図 4-9 に示す。レーザ光の入射面は反射の少ない黒色ペイントなどを付着させたディスク状の基板で、裏面は薄膜のサーモパイルを作成してレーザ光の吸収による温度上昇を検出して入射パワーを測定する。パワーレベルによって基板の厚さや材質を使い分ける。このユニットはサーモパイルの冷接点を温度の基準とするため、レーザ入射口のみ残し金属性のブロックに挿入され温度の安定を図る。高パワー測定では、温度基準ブロックに水冷系を付帯する。校正されたもので 1~3% の確度である。

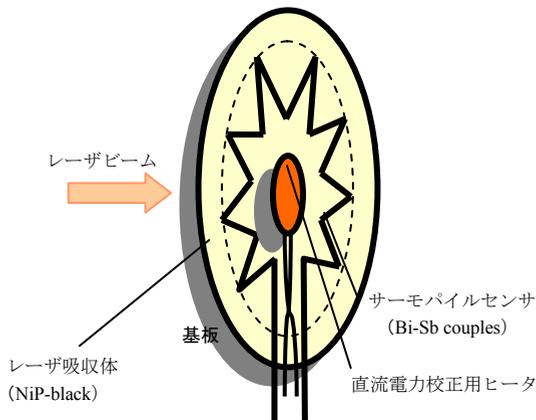


図 4-9 サーモパイルユニット

パワーの絶対値を計測する標準や高パワー域の測定ではレーザービーム測定専用に開発されたカロリメータが用いられる。その受光部は入射したビームをすべて吸収するように黒体に近づけて設計される。照射面はディスク状の吸収型のほか、高パワー域では多面吸収型、固体や液体の体積で吸収する受光器も考えられている。高精度の測定を実現した例として、熱電冷却素子を用いて受光器の温度を常に一定温度に制御する等温制御方式のレーザーカロリメータ¹⁾の原理を図4・10に示す。受光器は入射ビームの第一照射面となるディスク吸収体、吸収体での反射光を捕らえるため内面を黒化した円筒状のカバーを取り付けたものである。熱電素子で基準点との温度差を検出して吸収体に埋め込まれたヒータにフィードバックして受光器を基準温度に制御する。レーザー照射のオン・オフに対し、この制御に必要な直流電力の差からレーザーパワーの絶対値を決定する。性能は0.45~1.6 μmの波長域、50 μW~10 mWで測定の不確かさ0.15%を得ている。

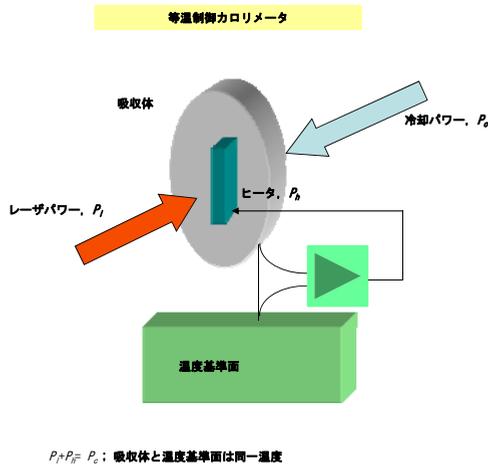


図4・10 等温制御方式のレーザーカロリメータ¹⁾の原理

標準カロリメータ(一次標準器)は取り扱いが煩雑で測定時間も長く、常用には適さない。通常、一次標準器で決定された絶対値は定期的に実用標準器へ値付けされ、未知パワーメータの校正はこの実用標準器と比較して行われる。実用標準器は応答が速く、感度が高いなど常用に適するとともに、十分な安定度が要求される。最近、実用標準器を一次標準器に内蔵した二重構造のカロリメータが開発され、10 W レベルの校正に供用されている²⁾。

近年、極低温で動作する光放射計を基準とする技術の高精度化が成され、この技術がレーザーパワー標準にも応用され始めた。極低温放射計(クライオ・ラジオメータ)の特性例を表4・2に示す。NIST(米国)、PTB(ドイツ)、NPL(英国)など先進標準研究所でレーザーパワー測定用に改良されているが、精度の評価及びその確認は容易ではない^{3,4)}。更に、常温で動作する未知パワーメータの校正まで複数の手順を要し、現状では上記の等温制御方式カロリメータの場合と同等の精度である。一次標準器の精度を維持した未知パワーメータへのトレーサビリティ技術の確保が望まれる。

光ファイバからの放射パワーは、レーザビーム用の受光素子の前に光ファイバコネクタやピッグテール用のアダプタを接続して測定する。光ファイバから放射される出力はファイバ端面の研磨条件に依存するが、約 4% のパワーが反射され、残りが放射パワーとして測定される。レーザビーム測定時以外の不確かさ要因として、光ファイバの端面と検出器間の多重反射、クラッドモード、偏光依存性などが加わる。市販のパワーメータには、フォトダイオードを受光素子とし、 $-100 \sim -10$ dBm のレベルを 3~5% で測定できるものが多い。単位は W, dBm, dB などと指示され、平均化処理を行い、分解能 0.001 dB 程度である。光ファイバパワー標準は、波長 $1.55 \mu\text{m}$ において $50 \mu\text{W} \sim 1 \text{ mW}$ で測定の不確かさ 0.3% を得ている。低パワー域は光減衰量標準との組合せで精度の維持が可能と考えられるが、高パワー域の測定が課題といえる。

表 4・2 極低温放射計（クライオ・ラジオメータ）の特性例

キャビティ動作温度	12 K
絶対精度	0.005%
必要な冷却	3 l/min. (20℃の水温)
受光器の応答	約 1.2 K/mW
最大パワー	2 mW
時定数	70 seconds
入射窓の伝播率	99.96% (波長 400 nm~800 nm)
キャビティ吸収率	波長 200 ~ 2000nm > 99.99%

■参考文献

- 1) T. Inoue, et al. "Automatic Calibration System for a Laser Power Meter," IEEE Trans. IM, vol.34, no.3, pp.431-436, 1985.
- 2) M. Endo and T. Inoue, "A Double Calorimeter for 10 W Level Laser Power Measurements," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.54, no.2, pp.688-691, 2005.
- 3) M. López, H. Hofer and S. Kück, "Measurement of the absorptance of a cryogenic radiometer cavity in the visible and near infrared," Metrologia vol.42, pp.400-405, 2005.
- 4) J.M. Houston and D.J. Livigni, "Comparison of Two Cryogenic Radiometers at NIST," NIST JRES vol.106, no.4, pp.641-647, 2001.

4-2-2 レーザパルスエネルギーの測定

(執筆者: 福田大治) [2009年1月 受領]

連続レーザ (Continuous wave laser) が時間的にほぼ一定のパワー出力をもつのに対し、パルスレーザ (pulsed laser) は図 4・11 のように時間的に離散した光出力をもつレーザである。パルスレーザの光出力を特徴づけるパラメータとして、パルスエネルギー、パルス幅、ピーク出力、平均出力、及び、繰り返し周期 (周波数) などが挙げられる¹⁾。パルスレーザは、同じ平均出力でも、短いパルス時間的にエネルギーが凝縮しているため高いピークパワーが得られるのが特徴である。この特性を利用して、Q-switched Nd:YAG レーザでは半導体精密部品の加工やマーキング、金属材料の溶接、エキシマレーザでは高密度リソグラフィ用の光源、また半導体レーザでは DVD や Blu-ray などの情報蓄積媒体への記録・再生光源など、様々な用途に応用されている。

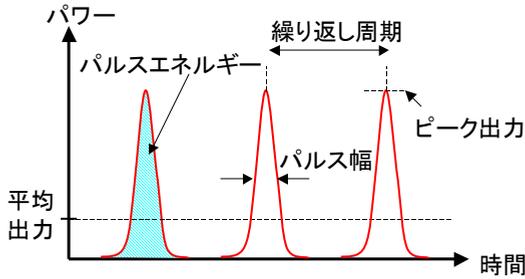


図 4・11 パルスレーザの光出力を特徴づけるパラメータ

レーザパルス光出力の測定に用いられている検出器の例を表 4・3 に示す。半導体によるフォトディテクタは、光入射による電子正孔対生成を検出原理としている。応答速度が高速であるため、レーザパルスの波形測定に用いられる。最近では、周波数帯域 60 GHz 以上をもつ検出器も利用可能である。一方、レーザパルスのエネルギーや平均パワーの測定にはサーモパイル検出器や焦電型検出器が用いられている。サーモパイル検出器 (thermopile detector) は吸収体と多数の熱電対の堆からなり、ゼーベック効果 (Seebeck effect) を利用してレーザエネルギー入射による吸収体の温度上昇を検出するものである。吸収体の光反射率はレーザ波長に依存しないため、広い波長範囲にわたってほぼ一定の感度をもつ。応答速度は、吸収体の熱容量と外部との熱的な結合の強さによって決まり、通常数秒と比較的遅い。そのため、サーモパイル検出器は、シングルパルスのエネルギー測定や平均パワー測定に使用されることが多い。一方、焦電型検出器は誘電体の焦電効果 (pyroelectric effect) を利用して入射エネルギーの検出を行う測定器である。自発分極している誘電体にパルスレーザが入射すると吸収したエネルギーにより温度が上昇し、これにより誘電体の分極構造が変化する。この分極変化により生じた電荷を電圧信号として読み出す。この分極構造の変化は、通常 ms 程度で元の平衡状態へと戻る。そのため、焦電型検出器はサーモパイル検出器に比べて応答速度が速く、高い繰り返し周波数まで使用することが可能である。最近では、10 kHz の繰り返し周波数でも各パルスのエネルギーが測定可能となっている。

表 4・3 パルスレーザの光出力測定器の種類と特徴

測定器の種類	分類	特徴	用途
半導体検出器	量子型検出器	信号応答が高速(信号帯域数十 GHz 以上)、感度の波長依存性がある	パルス波形計測
サーモパイル検出器	熱型検出器	感度は波長に対してほぼ一様、応答が遅い	シングルパルスのエネルギー計測、平均パワー計測
焦電型検出器		数 kHz の繰り返し周波数で測定可能、波長によらずほぼ一様な感度	エネルギー計測、平均パワー計測

サーモパイル検出器や焦電型検出器でエネルギーを測定する場合、パル入射により生じた最大電圧 (ΔV) は入射エネルギー量 E に比例する。よって、あらかじめ検出器の感度 $S = \Delta V / E$ を校正しておけば、未知の光パルスのエネルギー E' は観測量 $\Delta V'$ から $E' = \Delta V' / S$ として決定できる。図 4・12 に、これら一連のエネルギー測定器システムを示す。時系列の電圧信号からコンパレータや A/D 変換器などで $\Delta V'$ を求め感度 S から E' を導出する信号処理部、及びその結果を表示するディスプレイが基本構造となっている。 S は検出器固有の値であるため、メモリなどに記憶され検出部と一体となっていることが多い。

以上、レーザエネルギーメータは、検出感度、応答速度、最大測定エネルギーなど、様々なタイプのものが市販されている。測定対象となるパルスレーザの特性に合わせて適切な検出器を選択する必要がある。また、検出器には、入射可能な最大エネルギー密度 (損傷閾値) が決められている。レーザパルスのエネルギーが大きい場合には、ビーム径を広げてエネルギー密度を下げ、この損傷閾値を超えないようにして使用する必要がある。

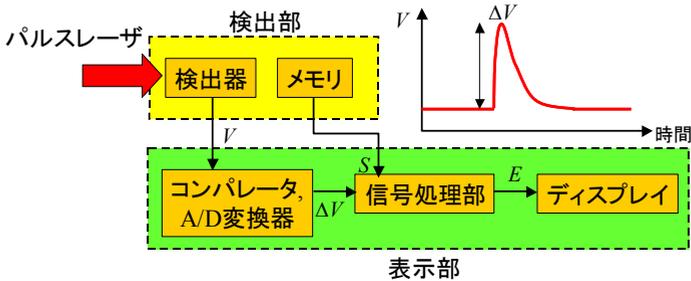


図 4・12 レーザエネルギー・ジュールメータ測定装置の模式図

感度 S については、エネルギー測定器の各メーカーは自社内の標準器を計量機関で定義づけられた標準量²⁾で校正を受けることでトレーサビリティを確保している。このエネルギー標準を実現するために各国の計量機関で行われている方法³⁾を図 4・13 に示す。パワー安定化した連続レーザから機械式シャッターあるいは光変調器で矩形形状のレーザパルスを生成する。このパルスをビームスプリッタにより分岐し、一方をパルス幅計測用の高速フォトディテクタ、もう一方を校正器物へと入射させる。シャッターを開放状態にしたとき標準器で測定したパワーを P_s 、高速フォトディテクタにより測定した時間幅を T_w とすると、校正器物に入射する絶対エネルギーは、 $E = P_s \times T_w$ として求められる。 P_s はレーザパワー標準、 T_w は時間標準からトレーサブルなかたちで決定可能である。この方法では、不確かさとして 0.15% が実現されている。

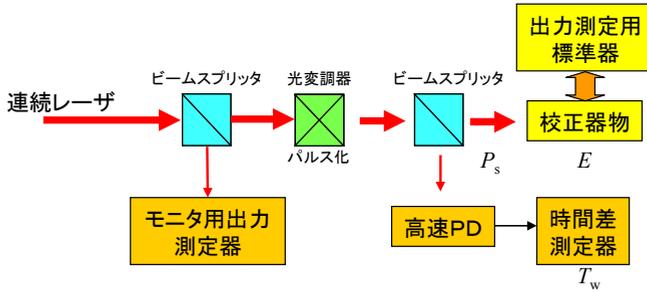


図 4・13 エネルギー標準を実現させるための実験体系

なお、パルスレーザはそのエネルギーが短いパルス幅中に凝縮されているため、網膜や皮膚に安全面に特に留意して使用する必要がある。レーザ製品の安全性に関する国際規格 IEC としては「IEC 60825-1 Safety of laser products」、国内規格 JIS としては「JIS C 6802-2005 レーザ製品の安全基準」が制定されている。

■参考文献

- 1) JISC6180 レーザ出力測定方法
- 2) 福田大治, “レーザエネルギー標準の開発,” 産総研 Today, vol.5, no.6, pp.36-37, 2005.
- 3) K Möstl, et al, “A New Method to Establish a Scale for Laser Pulse Energies,” Metrologia vol.28, pp.121-124, 1991.

4-2-3 光減衰量の測定

(執筆者: 向井誠二) [2009年9月 受領]

光ファイバや装置の中を伝搬する光は吸収や散乱を受け徐々に減衰して出力される。このときの入力光パワーを P_1 、出力光パワーを P_2 とすると、その比は光減衰量と呼ばれ通常 dB 表示, $10\log(P_1/P_2)$ で定義される。光減衰量は光測定器やデバイスの特性を示す重要な指標であり、それを正確に測定するため光減衰量標準が必要である。

光パワーメータは光通信分野では最も基本的な測定器であり、100 dB (10^{10} 倍) の広ダイナミックレンジをもつものが市販されている。しかし、このような広いパワー範囲全域を、カロリメトリックな測定に基づく光パワー標準との比較により校正するのは不可能である。このため、新たに、応答直線性 (広いパワー範囲においてパワーメータの指示値がどの程度正確に入射光パワーに比例しているか) の標準が必要となる。光パワーメータの直線性が校正されれば、減衰量の正確な測定が可能になるので、広ダイナミックレンジの光減衰量標準も実現され、各種の光デバイスの校正も可能となる。すなわち、光パワーメータの直線性の標準と減衰量標準とは同じ意味となり同時に実現される。

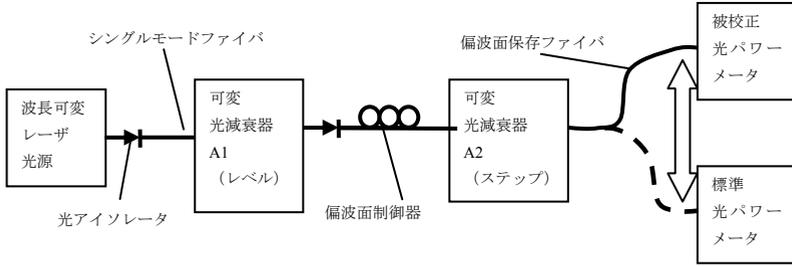


図 4-14 減衰量増分法による光パワーメータ直線性校正装置

図 4-14 に減衰量増分法により光パワーメータの直線性校正装置の構成例を示す 1)。被校正パワーメータを可変光減衰器 A2 に接続し、A2 を既知の減衰量 α dB だけステップ状に変え、その際の被校正パワーメータの指示値変化 α' [dB] との差を調べることで、このパワー区間での直線性が評価される。可変光減衰器 A1 を使ってパワー区間が隣り合うように徐々に設定し、同様の測定を繰り返すことにより、広いパワー範囲における直線性が校正される。ここで基準になる減衰量ステップ α は、A2 の接続を標準パワーメータに切り替えて同様の測定を行って求める。この方法では、次に述べる方法と異なり、ステップ減衰量 α を自由に選ぶことができる (例えば、 $\alpha = 10$ dB) ので、広パワー範囲を少数の区間でカバーすることができる利点がある。

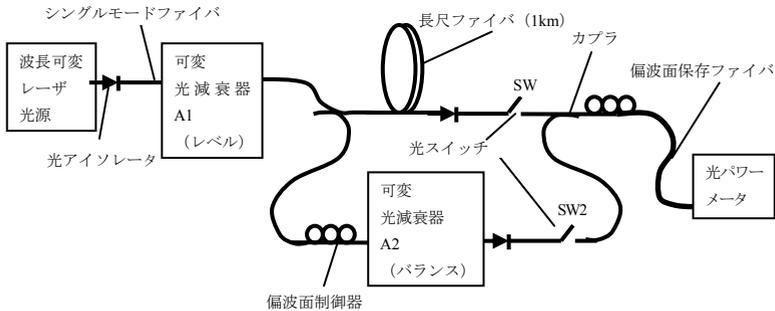


図 4-15 重ね合わせ法による光パワーメータ直線性校正装置

上記の標準パワーメータの直線性は図 4-15 の重ね合わせ法により校正する²⁾。光スイッチ SW1 と SW2 のそれぞれ一方だけを ON にした場合の光パワーメータへの入力を等しく設定すると、両 SW を ON にした場合の光パワーは一方だけが ON の場合のパワーの正確に 2 倍になるので、これらに対する指示値変化を調べれば光パワーメータの直線性を決定することができる。この方法は、パワー比が 3dB (2 倍) と小さいため積み重ねて範囲を大きく拡大するのは難しいが、基準器を必要としないという利点がある。

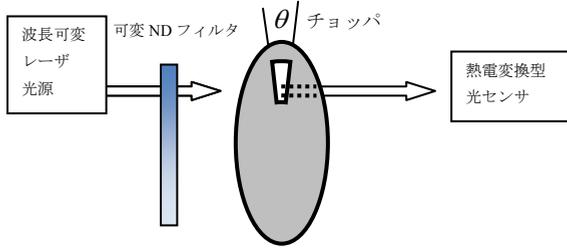


図 4-16 チョップパによる光減衰量校正装置

空間ビーム光に対する光減衰量校正装置の構成例を図 4-16 に示す³⁾。ビーム光を開口角 θ のチョップパを通すと、その平均パワーは断続のデューティ比 $\theta/2\pi$ に等しい減衰をする。断続の周期に比べ十分長い時定数をもつ熱電変換型センサを用いてこの断続光を測定すると、チョップパ通過による平均パワーの減衰 $\theta/2\pi$ に対するこのセンサの直線性を校正できる。いったん直線性が校正されれば、このセンサを用いて連続光の光減衰量を決定できる。この方法では光減衰量が開口角の測定から求められる。

■参考文献

- 1) 向井誠二, 井上武海, 信学技報, OPE2003-282, Feb. 2004.
- 2) I. Vayshenker, S. Yang, X. Li, and T.R. Scott, "Automated measurement of nonlinearity of optical fiber power meters," Proc. SPIE, vol.2550, pp.12-19, 1995.
- 3) JIS C 6188, "測定用光減衰器試験方法"