有害紫外放射照度計の開発

専門会員 中川 靖夫* 専門会員 大谷 文雄*
正会員 谷 治 環* 笛木 広久* 藪崎 憲司**
専門会員 河本 康太郎***

Development of an Eye-hazardous UV Irradiance Meter

Yasuo Nakagawa (Fellow Member), Fumio Ohtani (Fellow Member)
Tamaki Yaji (Member), Hiroyuki Fueki
(Saitama University)
Kenji Yabusaki
(Tokyo Optical Co.)
and Kohtaro Kohmoto (Fellow Member)
(Toshiba Coropration)

ABSTRACT

JIS Z 8812 "Measuring method of eye-hazardous UV radiation" which defined for a degree of hazard of the UV radiation against the skin and the eyes of human body was revised in 1984. The convenient eye-hazardous UV irradiance meters suitable for the definition have been developed. Which consist of a phototube with Cs-Te photocathode, interference filter for spectral responsivity correction and a diffusing system for incident angle characteristics correction. A photocurrent amplifier and a power supply are also built-in. Measurements of the incident angle characteristics, the spectral responsivity and the effective detectivity on the fabricated irradiance meters were carried out.

As the results, the incident angle characteristics was improved remarkably for that of the UV irradiance meters heretofore in use, and was close to that of the illuminance meter for visible region. In the wavelength region of 250~300 nm the spectral responsivity well agreed with the relative spectral effectiveness of ACGIH. The effective detectivity was over. 0.01 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ at 270 nm. The results shows that the fabricated irradiance meters satisfy the definition of new JIS Z 8812.

1. 有害紫外放射の規定と TLV

波長 320 nm 以下の紫外放射が人間の目や皮膚に当たるとき、その照射量（放射束と時間の積）がある限度を越えると、有害であることは以前から知られていた。このときの典型的な症状は、目に対しては角膜炎（雪盲）であり、皮膚に対しては紅斑（日焼け）であることもよく知られている。目と皮膚に対するこのような障害の波長特性（分光応答特性、分光効果特性）には種々の研究があり、目に対しては Fischer¹⁾、後述する ACGIH²⁾ のもの、皮膚に対しては Luckiesh³⁾、Everett⁴⁾、大川原・佐藤⁵⁾ のものなどが知られている。目と皮膚に対する放射の作用は、おおよその波長域は一致しているが、分光効果曲線の形状や効果の絶対レベ

ルはそれぞれかなり異なり、一般に目に対する効果のほうが鋭敏で限界値**** は分光効果の最大波長で目については $4\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、

図 1 目と皮膚に対する有害効果の分光特性
(1) Fischer (1936), (2) ACGIH (1983~84)
(3) 大川原 (昭49), (4) Luckiesh (1939)

* 埼玉大学工学部 〒 338 浦和市下大久保 255
255 Shimoookubo Urawashi, Saitama 338 Japan
** 東京光学機械㈱ 〒 174 東京都板橋区蓮沼町 75-1
75-1 Hasunumacho, Itabashi-ku, Tokyo 174 Japan
*** ㈱東芝 川崎市幸区小向東芝町 1
1 Komukai-Toshibacho Saiwai-ku Kawasaki Kanagawa 210
Japan
本稿の一部は昭和60年度照明学会全国大会で発表した。

**** 目の場合は眼炎の発生限界、皮膚については（日本人の）紅斑の発生限界。

皮膚については $8 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 程度の値が示されている¹⁾⁵⁾。眼炎や日焼けの症状は通常は一過性であるが、このような症状をもたらすような放射環境は労働衛生上避けるべきことであるので、何らかの規定を設けて防護することは当然である。わが国では1976年に Fischer らのデータに基づいて、JIS Z 8812「有害紫外線の測定方法」を制定した。しかし、最近では ACGIH* の勧告による分光効果曲線と TLV (Threshold Limit Values, いき限界値) が国際的な規準として認められる情勢になってきている。ACGIH のデータは、分光効果曲線が Fischer らのものとはかなり異なっているが、最も特徴的なのは TLV を明記したことである。すなわち、分光効果特性を $S(\lambda)$ 、放射の分光分布を $E(\lambda)$ として、有害放射照度 E_{eff} を(1)式のように定める。

$$E_{eff} = \int_{200}^{315} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}] \dots \dots \dots (1)$$

表 1 有害放射の TLV

(a) TLV 分光特性			(b) 許容照射量	
波 長 (nm)	TLV ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)	相 対 分 光 効 果 $S(\lambda)$	照 射 時 間 (1 日 当 た り)	実 効 放 射 照 度 E_{eff} ($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
200	100	0.03	8 時間	0.1
210	40	0.075	4	0.2
220	25	0.12	2	0.4
230	16	0.19	1	0.8
240	10	0.30	30 分	1.7
250	7.0	0.43	15	3.3
254	6.0	0.5	10	5
260	4.6	0.65	5	10
270	3.0	1.0	1	50
280	3.4	0.88	30 秒	100
290	4.7	0.64	10	300
300	10	0.30	1.0	3,000
305	50	0.06	0.5	6,000
310	200	0.015	0.1	30,000
315	1000	0.003		

そして、照射時間を t として、 $E_{eff} \cdot t = 3 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2} < 0.1 \text{ s} > t > 8 \text{ h}$ を TLV とする。この TLV はくり返して照射を受けるときの許容限界である(表 1)。この考え方は従来の JIS よりも一歩進んだものであり、JIS としても国際的観点から、これとの整合性が問題とされるので、見直しが論議されて1984年に新 JIS Z 8812「有害紫外放射の測定方法」が制定された。

新 JIS の内容は、ほぼ ACGIH に沿ったものであり、ACGIH 勧告値を計量できるような測定器の仕様も示されている。この測定器への要求はかなり高度なものであって、仕様を満足して、取り扱いが容易で、価格的にも一般性のあるものが実現できるかどうかは必ずしも十分に検討されてはいない。つまり、ソフトウェアは完成したが、ソフトに見合うハードウェアは規格制定の段階では実現していなかった。

筆者らはこのような経緯をふまえて、新 JIS Z 8812 に適合するような有害紫外線放射照度計の開発を試み、仕様を満足するような結果を得たので以下に報告する。

2. 有害紫外放射環境の実態

有害紫外放射環境の典型的な例としては、(1)殺菌灯を使用する調理室、(2)アーク溶接の現場、などがあげられる。いまこれらの放射環境を考えてみる。15 W 殺菌ランプ GL-15 の 253.7 nm 放射照度は、管軸に直角な方向で 1 m 離れて $35 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 程度である**。この状態で光源を直視すると、約 1.5 分で TLV に達する。実際に直視することはないとしても、このレベルの 1/100 程度が散乱光として入射すると、2～3 時間で TLV になり、現実

図 2 溶接光の分光分布の一例 (MAG 溶接)

に有り得る状態である。

図 2 は MAG アーク溶接(不活性ガス被覆溶接)の分光放射の一例であって⁶⁾、1.5 m 離れた位置での放射照度を示す。この場合は、波長 200～300 nm で $40 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ を越える強い放射が認められる。この状態での(1)式による E_{eff} は $0.5 \text{ mJ} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 程度⁶⁾、直視すれば 6 秒で TLV になり 1/1000 が散乱光として入射しても約 2 時間で TLV に達する。したがって、このような放射環境では、散乱光を十分に考慮して作業面の照射量を十分よく監視する必要がある。

前述したように有害放射の量の評価は、ACGIH の分光効果曲線によって波長的に重みをつけた、単位面積(平面)当たりへ入射する放射束、つまり放射照度によることになっている。しかし、受光面が眼球表面のような半球状面や人間の身体(近似的に円筒面)であれば、このような曲面へ入射する放射束は、球面照度や円筒面照度で評価するほうが実際的ではないか、との見解もあり、その適否は今後十分に検討する必要がある。

3. 有害紫外放射照度計の仕様と受光器の選定

これまでに述べてきたような事項を考慮して、有害紫外放射照度計を検討すると、JIS Z 8812 の規定を満足するには次のような特性が必要になる。

- (1) 相対分光応答度を ACGIH で規定している相対分光効果曲線とできるだけ一致させる。
- (2) 散乱光成分を過不足なく受光するために、斜め入射光特性は余弦則に従い、波長によって変化しない。
- (3) 測定の最小目盛を、8 時間照射の TLV、すなわち $E_{eff} = 0.1 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (波長 270 nm で $0.1 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、254 nm では $0.2 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$) よりも 1 桁よくする。

また、小型軽量化、電源の内蔵なども実用測定器として考慮すべきことである。

このような要求の実現には、まず適当な光電受光器を選定して、それに波長特性と斜め入射光特性の補正を検討する。対象波長域を 200～320 nm とすると、受光器はほぼ Cs-Te 陰極の光電管に限定される***。斜め入射光補正のための拡散性材料も石英、UV 透過ガラスに限定される。したがって、分光応答度はいずれも帯域フィルタ(この波長では干渉フィルタ)を組み合わせることで決定することになる。波長特性、斜め入射光特性の補正によって、光電面への入射は直射の状態より 2～3 桁低下すると考えら

* American Conference of Governmental Industrial Hygienists 米国政府産業衛生官会議。

** 筆者らによる実測値。

*** 紫外・可視に応答する受光器は多数あるが、可視域の応答を完全に遮断するのが難しい。

れるので、光電流の検出には十分の工夫が必要になる。代表的な Cs-Te 光電管 R 765 の放射感度は、波長 250 nm 付近で $10 \text{ nA} \cdot \mu\text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ 程度であるから、 E_{eff} で $0.1 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 入射での出力光電流は、波長、斜め入射光補正で 1/100 ぐらいになるとすると 10 pA 程度である。一方、この光電管の暗雑音レベルは 0.1 pA 程度（暗電流定格値の 1/10 ぐらい）であることが確かめられたので、 $0.01 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ が検出可能と考えた。

受光器として光電子増倍管 (PM) を用いると、検出能力の制約は大幅に緩和するが、電源が制約されるし、感度の校正頻度が増加して、実用的には校正放射源を付属させるようになるので、簡便性を欠くし、コスト的にも不相当であると考えた。

4. 斜め入射光特性と分光応答度

4.1 斜め入射光補正の考え方

有害紫外放射照度の測定に際して、散乱光の評価が重要であることはすでに述べたが、従来の紫外放射照度計では、紫外域でよい拡散性を持つ拡散面がないために、斜め入射光特性が余弦則から大きく外れることが多かった。白石はこの点を改良する研究を行なって、拡散ドーム、拡散板、遮光板などを併用して、紫外域でも余弦則に近い斜め入射光特性が得られることを示した⁷⁾。しかし、この研究は半円筒面または半球面の光電面との組み合わせで、その際の光電面と拡散系との定量的位置関係や、指向性を持つ干渉フィルタ（波長補正用）などとの組み合わせ、とくに波長による特性の変化については明らかにされていない。また、峰松は、干渉フィルタを組み合わせたときに、余弦則を満足するような入射系を検討して、良好な波長特性を得ているが⁸⁾、フィルタと光電面の間に細管の束* を設けて入射角制限を行なっているので、構造が複雑で損失も大きい。

筆者らは、基本的に白石の方法⁷⁾ を用いて、拡散系、干渉フィルタ、受光面（円板状）の位置および入射立体角の関係を系統的に検討した。その結果、斜め入射特性が余弦則に近く、かつ波長によってほとんど変化しない条件を求めて、図 3 のような受光素子構成を決定した。以下、この配置を決定した手続を述べる。

図3 受光部の光学系の構成
(1) UV ガラス両面フロストドーム、(2) 角特性補正用バッフル、(3) 角特性補正用ガードリング、(4) 前面パネル、(5) 石英拡散板両面 120メッシュ砂すり、(6) 干渉フィルタ、(7) 光電管 HTV R765 (陰極 8φ)

4.2 構成素子の分光特性の測定

図4に受光部構成素子（図3、表2参照）の分光特性の測定系を示す。モノクロメータからの単色出射光は 12.5 Hz で断続し

* 注射針の内面を黒化して使用。

表2 受光部構成素子の定指

品 名	仕 様 ・ 定 格
ド ー ム	UV ガラス両面フロスト半球形、内径 22φ
石 英 拡 散 板	両面砂すり120メッシュ、20φ
干 渉 フ ィ ル タ	径 25φ (特性は図6)
光 電 管	R 765, Cs-Te 陰極 8φ 感度 23 mA・W ⁻¹ (220 nm) 陽極電圧 15 V

図4 受光部構成素子の分光特性測定系
S: 光源 D₂, Hg ランプ, Ch: 12.5 Hz チョップ、I: 視野レンズ, P: 試料および標準受光器, M_{1,2}: 集光ミラー
Mc: G-250モノクロメータ, F: 透過測定試料

て、測定する各素子の開口面を完全に覆うように配置した。光電管の分光応答度は PVF₂ 焦電形光検出器⁹⁾ を比較標準として測定した。光電流の検出はロックイン増幅器を使用した。単色出射光の実効波長は 5~6.7 nm である。

測定は、まず光電管、拡散板、ドームについて個別に行ない、これらを組み合わせたものと、ACGIH の分光効果特性との差を求めて、この差に一致する分光特性を波長補正用フィルタの理想特性と考えた。そして、理想特性にできるだけ近似するような干

図5 受光部構成素子の分光特性の測定例
(1) R 765 光電管の分光応答度、(2) ドーム・拡散板の分光透過特性（法線方向）、(3) 実際の干渉フィルタの分光透過特性、(4) 理想的フィルタの分光透過特性

渉フィルタを製作者に依頼した。図5に光電管、拡散光学系、理想フィルタ、および現実に製作できたフィルタの分光特性を示す。各素子は、それぞれ2~3個ずつ用意して測定したが、個体差は数%以内（相対値で）であった。

干渉フィルタは、分光透過特性が入射角（または出射角）によって変化するので、その度合いを調べるために、図4の配置で干渉フィルタを傾けて分光透過率を測定した。その結果の一例を図6に示す。これから、入射角10°まではほぼ問題なく、入射ビーム中に含まれる斜め光成分の入射角は、最大 25° ぐらいまでは許容できると考えた。

図6 干渉フィルタ分光透過率と入射角 θ の関係

4.3 斜め入射光特性

斜め入射光特性（以下単に角特性とよぶ）の測定は、アーム長 500 mm のゴニオメータを用いた。受光部は図3の石英拡散板（⑤）入射面をゴニオ回転軸中心と一致させて、アーム先端に光源を置いて、入射角 $\pm 0 \sim 90^\circ$ （ 10° ごと）の測定を行なった。光源・受光部間は 400 mm である。光源は主として 25 W 重水素ランプを用いた（分光分布は図9参照）。測定光電流レベルは $10^{-8} \sim 10^{-11}$ A (DC) である。測定は以下のような手順で行なった。

(1) 干渉フィルタから光電管受光面へ入射する斜め光成分の最大入射が約 24° になるように、フィルタと光電管の位置関係を定めて、干渉フィルタの直前に石英拡散板、拡散ドームを置いて角特性を測定（図7(a)）。

(2) 角特性を余弦則に近づけるためには、(1)の状態での法線方向からの入射を制限する必要があると考えて、ドーム頂部からの入射を制限する円形の遮光板（黒色の厚紙：パッフル）を設けて（図3参照）、パッフルの寸法を種々検討して、内径 22 mm のドームに対してパッフル径 12~13 mm が最もよいことを見いだした（図7(b)）。

(3) この状態で、大入射角での特性がよくないので、大入射角

図7 試作器の斜め入射光特性
(a) ドーム、拡散板のみ
(b) パッフル、ガードリングを併用
(c) 斜め入射光の波長特性

の入射を制限するガードリング（図3参照）を設けて、この径と高さを種々検討して、内径 22 mm のドームに対して、径 60 mm、高さ 7 mm のガードリングが適当であることを確認した（図7(b)）。

(4) このようにして、ほぼ余弦則に近似した角特性が得られたので、光源を 4 W 殺菌ランプおよび 8 W 健康線ランプ（最大出力波長 315 nm）にして角特性を測定したが、光源の相違による角特性の差異はほとんど認められなかった。またモノクロメータからの単色光 259, 270, 302 nm で角特性を測定した場合（このときは受光面を傾ける）も、波長による角特性の差異はほとんどなかった（図7(c)）。干渉フィルタと光電管を近づけて、斜め入射光成分の最大入射角を 35° 程度とした場合は、波長による角特性の差異は多少増加したが、実用上問題とならない程度であった。

(5) 以上のような角特性の補正によって光電面への入射量は低下して、その割合は図8に示すようになった。

図8 斜め入射光特性補正による出力低下の状態
① 光電管+フィルタ、② ①+石英拡散板、③ 補正完了後、④ $\cos \theta$

4.4 分光応答特性と検出能力

角特性補正条件を決定した状態で、図4の測定系で法線方向入射での相対分光応答特性を測定した。光源は 200 W 重水素ランプ標準は PVF₂ 焦電形光検出器である。結果を図9に示す。ACGIH の分光効果曲線とは、波長 250~300 nm では比較的良好に近似できたが、短波長では感度が低くなり、長波長側では感度が高

図9 各種紫外放射源の分光分布と試作器の分光応答度

くなった。この原因は干渉フィルタの特性が理想的でなかったためである。

絶対感度は、253.7 nm 放射照度が値付けしてある 殺菌ランプ (GL-15) で、法線入射で測定した。2 台の試作器についての値はそれぞれ 4.2×10^{-1} , 2.7×10^{-11} ($\text{A} \cdot \mu\text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^2$) であり、270 nm における値はそれぞれ 8.5×10^{-11} , 5.5×10^{-11} ($\text{A} \cdot \mu\text{W}^{-1} \cdot \text{cm}^2$) となる。光電管の暗出力のゆらぎは後述する増幅系の雑音を含めて、 10^{-13} A 以下、すなわち入力換算 $1 \sim 2 \times 10^{-9} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以下であって、 $0.01 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ の検出は十分可能であり、8 時間の TLV はほぼ 2 桁の裕度で測定できる。

4.5 光電流増幅器

pA オーダの電流検出を行なうために、FET 入力の OP アンプ LF-356 による I-V コンバータ (10^8 V/A) と、バイポーラ OP アンプによる電圧利得約 100 倍の直流増幅器を組み合わせて、光電流増幅器とした。雑音を押さえるため、I-V コンバータ部は受光部と一体にして、利得切換えはリードリレーを用いた。回路の時定数は 0.22 s である。電源は ± 9 V の電池を ± 5 V の 3 端子レギュレータで安定化したものを用いた。出力のノイズとドリフトは入力換算で 0.1 pA 以下 (10 分間) で、十分安定な増幅能力があった。

5. 試作放射照度計の評価

5.1 ACGIH 分光効果との応答比較

試作器の分光応答特性は、250~300 nm では ACGIH 分光効果特性にかなりよく近似できたが、この範囲よりも短波長、長波長の域ではかなり外れている。このことが実際の光源の照射の測定でどのくらい影響するかを求めてみる。いま、光源の分光分布を $E(\lambda)$ ACGIH、試作器の分光応答特性をそれぞれ $S_0(\lambda)$, $S(\lambda)$ とすると、それぞれの応答 I_0 , I の比は次のようになる。

$$I/I_0 = \int_0^\infty E(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty E(\lambda) S_0(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots(2)$$

表 3 試作器の応答 (I) と ACGIH 分光効果で計算した
応答 (I₀) の比 (試作器/ACGIH で示す)

	殺菌ランプ	重水素ランプ	健康線ランプ*
No. 1	1.02	0.90	1.97
No. 2	1.02	0.89	2.01

* 東芝 FL20 SE 2 本平均。

この値を殺菌ランプ、重水素ランプ、健康線ランプ (それぞれ分光分布は実測した) について求めてみると、表 3 のようになった。放射パワーのピークが 300 nm 以上にある健康線ランプに対する応答が約 2 倍になることは問題であるが、保安の観点では安全側への偏りなので、光源による補正係数などの導入を考えれば実用可能と考えた。なお、 $S_0(\lambda)$ と $S(\lambda)$ の積分の比 K は、

$$K = \int_0^\infty S(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty S_0(\lambda) d\lambda \approx 1.05 \dots\dots\dots(3)$$

であって、よく一致するので、たとえば図 2 のアーク溶接光のように分光分布がほぼ平坦な有害放射に対する応答は、十分よいと思われる。

5.2 斜め入射光特性の評価

斜め入射光特性は、従来の紫外放射照度計と比較して著しく向上した。試作器の特性を JIS C 1609「照度計」で規定した A, B

図 10 試作器の斜め入射光特性の評価 (重水素ランプ放射による)

級と比較すると 図 10 のようになる。60°の値はやや悪いがほぼ同等とみなせる。紫外用でも可視域の規定に達することができたわけである。

6. 結 び

以上、新しい JIS Z 8812 の規定に適合する 有害紫外放射照度計の考え方、開発の手順、特性、評価について述べた。放射環境と人間の相互関係の検討は重要な課題であり、今後さらに、各種の効果・作用の波長の問題、空間の問題 (2. で述べた受光曲面の検討など)、時間的問題 (効果の遅延、相反則の検証など) を含めて評価できるような測定法、測定器が研究・開発されなければならない。

終わりに、本件について種々ご教示、ご討論いただいた東莞博士、芝浦工業大学・峰松陽一教授、株式会社東芝・森礼於博士、干渉フィルタ製作にご尽力いただいた日本真空光学株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

(1) JIS Z 8812-1976「有害紫外線の測定方法」
JIS Z 8812-1984「有害紫外放射の測定方法」
(2) ACGIH: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Work Environment (1983~84)
(3) Luckish, M., Taylor, A. H.: GE Rev. 42 (1939) 274
(4) M. Everett, A. et al: Ultraviolet Erythema, Arch. Dermatol 92 (1965) 713
(5) 大川原脩介: 本邦健康人皮膚における紫外線紅斑, 日本皮膚科学会誌 84-9 (昭49) 443
(6) 日本溶接協会: 溶接アークからの有害光線に関する調査研究 (昭59)
(7) 白石啓文: 紫外線放射計用角補正受光器 照学誌 57-2 (昭48) 116
(8) 峰松陽一ほか: 高分子材料のための蛍光ランプ人工促進暴露装置での放射照度モニター, 照明学会光放射の応用・関連計測研究会資料 AR-84-11 (昭59)
(9) Katsube, T., Nakagawa, Y.: Characteristics of Pyroelectric Cell as a Radiometric Detector 19th (IE P-79-25 (1979)
(10) JIS C 1609-1983「照度計」

(受付1985年5月22日)