

## 簡易紫外線スペクトロメータの開発と環境測定への応用

岩本 明憲\*\*, 占部 逸正\*

### Development of a UVR Spectrometer and Its Application to Environmental UVR measurements

Akinori IWAMOTO\*\* and Itsumasa URABE\*

#### ABSTRACT

Measurements of UVR spectra in the man's environment have become important on account of increasing concerns about the variation of the solar UVR due to depletion of the stratospheric ozone layer. In this study a multi-sensor spectrometer, which has a sensitivity in the wavelength range from 250 nm to 400 nm, has been developed and the possibility of employing it in environmental measurements is discussed for evaluation of unexpected UVR irradiation caused by man's various activities.

Keywords: ultraviolet radiation, spectrometer, spectrum unfolding, irradiance, environmental measurement, relative spectral effectiveness.

#### 1. 緒言

紫外線研究の歴史は量子力学の分野に始まる。照明工学の分野では紫外線の光生物学的効果を利用した殺菌灯、健康用蛍光灯、蛍光灯などの研究が行われ、その効果や危険性が論じられてきた<sup>1)</sup>。また近年、紫外線は半導体の製造過程で頻繁に用いられ、工業分野における利用範囲が急速に増大しつつある<sup>2)</sup>。他方、オゾン層破壊に起因する太陽光中有害紫外線の増大が問題になっており<sup>3)</sup>、紫外線の計測技術はその重要性を一層増す傾向にある。

紫外線測定器としては現在①UVA, UVB等の波長域に感度をもった放射照度計、②モノクロメータとセンサを組み合わせたスペクトル測定器、また③人体の紫外線の作用曲線に分光感度を合わせた有害紫外放射照度計などが開発されている<sup>4)</sup>。これらの方法のうち、①では人体における紫外線安全基準の評価に困難を伴うこと、②では装置が大がかりになること、③では作用効果関係が異なると使用できないことなど生活環境の安全情報を手軽に得る検出器としてはそれぞれ改善を要する点が見られる。

本研究は作用効果関係の多様性を考慮しつつ、広い波長域に分布する紫外線による被曝を安全基準とのかかわりで把握できる新しい測定・評価法の開発を目的としている。ここでは多センサーを有する簡易スペクトロメータを試作し、スペクトルの評価法として放射線のスペクトル分析に用いられるスペクトルアンフォールディング法を適用した紫外線スペクトル評価法の開発を行ない、いくつかの環境で試みた有害放射照度の評価結果について報告する。

## 2. アンフォールディングによるスペクトル算出法

検出器の出力を $Y(i)$  ( $i$ は出力の数)、感度を $A(\lambda, i)$ 、紫外線場のスペクトルを $X(\lambda)$ とすると、任意の検出器から得られる出力は次式の積分方程式で表される。

$$Y(i) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} A(\lambda, i) X(\lambda) d\lambda \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

この式を行列式で表すと、次のように示される。

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

ここで $y_i$ は $i$ 番目の検出器の出力、 $a_{ij}$ は $i$ 番目の検出器における $j$ 番目の波長間隔中の感度、 $x_j$ は $j$ 番目の波長間隔の紫外線の放射強度である。紫外線の分布は $j$ 個の間隔に分割されていて、紫外線スペクトルを求めることは、各検出器により得られる $i$ 個の $y_i$ より $x_j$ の値を求めることである。 $a_{ij}$ が既に解っているとすると、 $i \geq j$ であれば、全 $x_j$ 要素に対してこれらの方程式を解くことが理論的に可能となる。この過程がスペクトルアンフォールディングと呼ばれる<sup>5)</sup>。現実には検出器の数は限られており $i \geq j$ の関係は不可能であるため、この計算では行列式の両辺に応答行列の転置行列を乗じて正方化した後、 $x_j$ を逐次近似する方法を採用した<sup>6)</sup>。計算過程で得られる全 $x_j$ 要素は両どりの要素に対して一定の重みを付してスムージングを行うことでそれぞれ平均化を行い、計算で求めた $y_i$ と検出器で得た $y_i$ との差の2乗の最小値を探し出すことによって紫外線のスペクトルを評価した。

## 3. 実験

### 3.1 測定システムの構成

試作した紫外線スペクトロメータのブロック図をFig.1に示す。スペクトロメータは①センサ部、②電流-電圧変換部、③表示部で構成され、生活環境の様々な場所での測定を可能にするために、それらを電源とともに一つのプラスチックケースに一体化したものを製作した。センサ部の構造をFig.2に示す。センサは小型で紫外域に感度の中心を有する浜松ホトニクス社製のフォトダイオードG3614<sup>7)</sup>を用いた。また異なった分光感度をもたせるため応用光研製の金属干渉フィルタをフォトダイオードの受光面上にエポキシ系樹脂で固定した。使用したフィルタの中心波長 $\lambda_{\max}$ 、透過率 $T_{\max}$ 、半値幅 $\Delta\lambda_{1/2}$ をTable1に示す。フィルタの

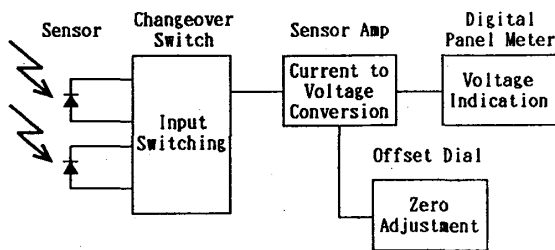


Figure 1. Block diagram of a multi-sensor UVR spectrometer.

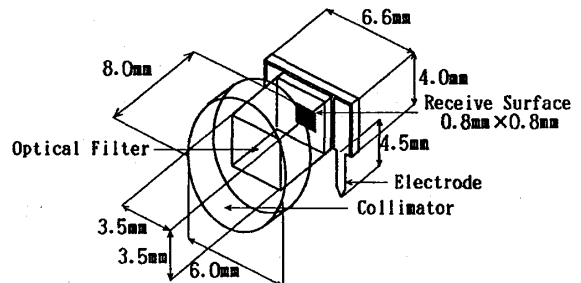


Figure 2. Assembly of a UVR sensor used for the spectrometer. The UVR sensor is constructed of a photodiode (HAMAMATSU: G3614) and an optical interference filter (OKEN MIF-W).

Table 1. Characteristics of the optical interference filters used for construction of the UVR sensor.

Filter	UVR components	$\lambda_{\max}$ [nm]	$T_{\max}$ [%]	$\Delta\lambda_{1/2}$ [nm]
No.1	C	219	18.5	15.0
No.2	C	261	17.7	17.3
No.3	B	290	21.4	19.1
No.4	B	307	22.4	12.7
No.5	A	337	22.6	12.7

中心波長は200nm～400nmの紫外線情報を得るよう選択した。電流－電圧変換部の回路図をFig.3に示す。この回路ではOPアンプのバイアス電流が変換誤差となるので、バイアス電流1.000pAのTexas Instrument社製OPアンプTLC271を用いた。変換率を決定する帰還抵抗は金属皮膜抵抗10.00M $\Omega$ を用い、0.1 $\mu$ Fのマイラコンデンサを並列接続して出力安定を図った。センサ出力端子とOPアンプ反転入力端子および帰還抵抗入力端子の結合点におけるリーク対策として結合点をテフロン端子上に固定し空中配線を行った。さらに入力切り換え用としてロータリースイッチ、オフセット調整用として零調整用回路を設けた。

電圧表示装置としては高感度、視認性、携帯性の点から、A/D変換部とセグメント駆動部、液晶表示部が一体化したXEBEC社のマイクロデジタルパネルメータXE-1230-100を使用した。

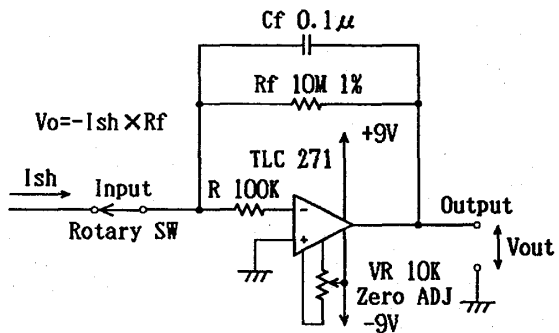


Figure 3. Current to voltage converter.  $I_{sh}$  and  $V_{out}$  represent input current and output voltage, respectively.

### 3. 2 紫外線スペクトロメータの特性試験

#### 3. 2. 1 分光感度測定

紫外線スペクトロメータの応答関数となる各センサの分光感度は75W Xeランプとモノクロメータを使用して決定した。測定によって得られる分光感度は出力電流の相対値となるため、分光された光によって得られたセンサの出力の合計がモノクロメータを取り外した状態でXeランプの光によって得られる出力と一致するよう各波長における出力電流を求めた。分光感度(A/W $\cdot$ nm)は測定により得られた出力をカタログから求めた各波長域の放射照度で除することによって決定した。

#### 3. 2. 2 安定光源の紫外線スペクトル測定

試作したシステムによって得られる紫外線スペクトルの精度を検討するため、このシステムを用いてスペクトルの明かな安定光源の紫外線スペクトルを測定し、技術資料との比較を行った。光源は75W Xeランプ、UV365ランプ、UV254ランプの3種類を使用した。測定はそれぞれ光源安定後、Xeランプについては光源の中心から50cmの距離で、UVランプについては光源の面の中心より50cmの距離で測定を行った。Xeランプ、UVランプの特性をTable2に示す。

Table 2. Characteristics of the light sources used for examination of accuracy of the spectra unfolded by the response matrix.

Light source	Light source shape	Irradiance
		$\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ at 50cm
75W Xe	Spot	0.56 at 550nm
UV254	Column $\phi$ 15mm $\times$ L145nm	59.3 at 250nm
UV365	Column $\phi$ 15mm $\times$ L145nm	49.4 at 365nm

### 3. 3 環境紫外線スペクトルの測定

生活環境における紫外光源として、①屋内の天井における蛍光灯、②体育館内の天井における水銀灯、③卓上のスタンドにおける白熱電球について測定した。測定方法はそれぞれの環境で、スペクトロメータのセンサ部を人間の目と仮定し、蛍光灯については福山大学3号館研究室内で立ち上がって天井を見上げた位置で、水銀灯については福山大学体育館内の正面入り口に立って天井を見上げた位置で、白熱電球については3号館研究室内の机に着いて卓上のスタンドを眺めた位置で実施した。

自然環境における光源として、福山大学3号館研究室の南窓に入射する太陽光の紫外線スペクトルの測定を行った。測定は1993年2月13日の11時10分と14時10分で、いずれの場合も快晴時を確認して実施した。尚、太陽は時間とともに移動するため、直射光がスペクトロメータのセンサ部に垂直に入射するように配置しながら測定を行った。

放射線作業環境として、大阪府泉南郡熊取町の京大原子炉実験所の電子線加速器LINAC施設周辺での紫外線スペクトルの測定を行った。測定場所は①マイクロ波発生装置室、②実験室、③制御室、④中性子測定室の4箇所で、スペクトロメータのセンサ部をLINAC方向に向けて測定を行った。尚、LINAC稼動時における紫外線発生の有無を調べるため、それぞれの場所においてLINAC稼動時と停止時の2種類の場合について測定を行った。

## 4. 結果および検討

### 4. 1 紫外線スペクトロメータの基礎特性

#### 4. 1. 1 分光感度特性

センサNo.2~No.7とG3614-NF（フィルターなし）の分光感度特性の測定結果をFig.4示す。図からNo.2~No.5の場合光学干渉フィルタの中心波長近傍で感度の最大値が得られているが、同時にG3614-NFの感度が340nm付近から急激に高くなるため、それぞれ370nm付近にも感度のピークが得られている。No.1のセンサについてはこの波長範囲におけるG3614-NFの感度が著しく低く十分な感度を得ることができなかつたため省略した。波長400nm付近のスペクトルの精度を上げるためセンサNo.6はセンサNo.2にUVカットフィルターを重ねたもの、センサNo.7は波長219.5nm透過率のピークを持つ光学フィルターにUVカットフィルターを重ねたものを使用した。これらよりこのスペクトロメータは短波長側に感度がないことを除けば波長250nm~400nm付近のスペクトル測定に適用可能と思われる。

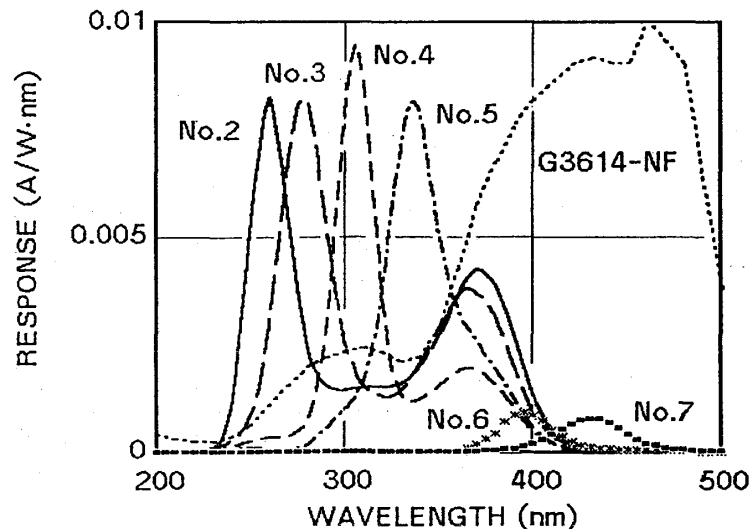


Figure 4. Spectral Responses of the UVR spectrometer.

#### 4. 1. 2 スペクトル測定の精度

スペクトロメータによる安定光源の測定結果をFig. 5に実線で示す。比較のためXeランプについてはメーカー提供のスペクトルを、UV254, UV365ランプについてはモノクロメータを使用して得たスペクトルの相対値にメーカー提供の全放射照度を50cmの距離における値に換算したスペクトルを点線で示した。ここでは後者を真のスペクトルとして検討する。Xeランプについては、波長230nm~420nmの範囲において真のスペクトルと一致しているのが分かる。UV254, UV365ランプについてはスペクトルの形が全体的に短波長側にずれており、UV254については放射強度のピーク値が真のスペクトルより低くなっているのが分かる。これらの原因は、主にセンサの分光感度の分布位置が急激なピークを持つスペクトルの評価は不適切なために生じたものと思われる。

以上の結果より、ここで開発した方法は散乱光の影響が少なく250nm~400nmの比較的広い波長範囲に分布するスペクトルに対しては有効であるが、きわめて狭い波長域に分布する紫外線に対しては7.5%程度のピーク値の相違の現れることが明かとなった。

#### 4. 2 環境中紫外線スペクトルの評価

##### 4. 2. 1 生活環境内の紫外線スペクトル

生活環境の紫外線スペクトル測定結果をFig. 6に示す。図では室内の天井に取り付けた蛍光灯のスペクトルを“Fluorescence”、体育館内の天井に取り付けた水銀灯のスペクトルを“Mercury”、卓上のスタンドに使用されている白熱電球のスペクトルを“Incandescent”と示した。蛍光灯は低圧水銀蒸気中のアーク放電による紫外線によって励起を受けた蛍光物質の放電ルミネセンスによる発光であり、水銀の原子スペクトルを放射している<sup>8)</sup>。測定結果では313nmと405nmの線スペクトルに起因するピークが見られるが、365nmに起因するものは見られなかった。さらに300nm以下のピークは水銀の297nmと302nmラインに起因すると思われるが、このラインは他のラインより2桁程度小さいとされており、計算の過程で行ったスムージングの影響も含まれていると思われる。水銀灯は水銀蒸気中の放電により励起された水銀原子の発光を積極的に利用したものであり<sup>8)</sup>、測定結果では302nm, 313nm, 365nm, 405nmの線スペクトルに起因する紫外光がスムージングの影響を受けてなめらかな曲線となって観測されている。また300nm以下については297nmのラインが明瞭に現れており、測定誤差を考慮しても、蛍光灯のそれより強度がかなり大きいと思われる。白熱電球についてはフィラメントの温度放射による発光を利用するため水銀の線スペクトルは存在せず<sup>9)</sup>、線スペクトルに起因するピークは見あたらない。ただし他の光源と

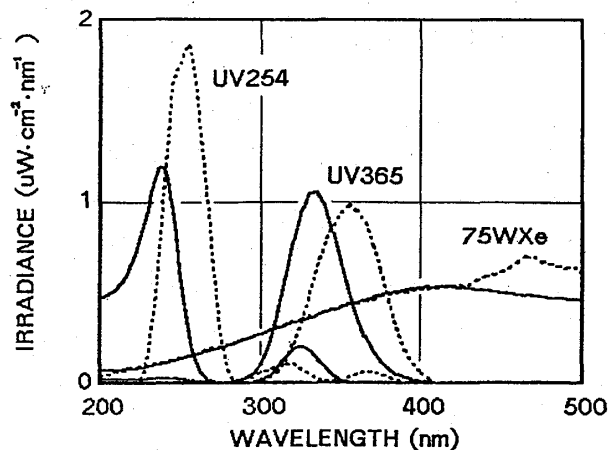


Figure 5. Comparison between the spectra taken from the technical data and those unfolded with the response matrix. Broken lines and Solid lines show the reference data and the unfolded spectra, respectively.

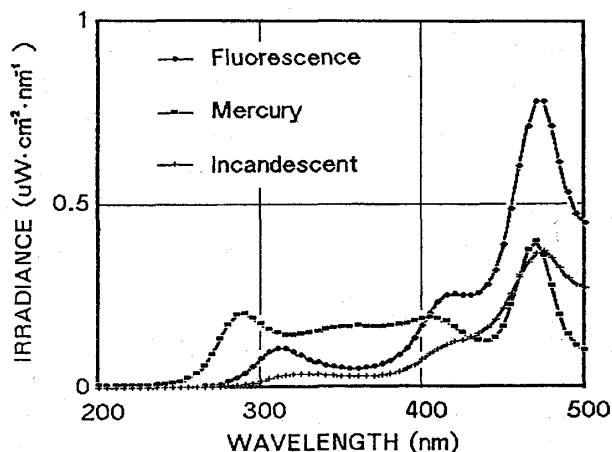


Figure 6. Spectra of UVR in the living environments. Solid circles, squares and crosses show the spectra given by fluorescent lamps, mercury lamps and incandiscet lamps, respectively.

比べて弱い紫外線が分布するが、これはフィラメントおよび白熱電球内気体分子の発光と関連すると思われる。

#### 4. 2. 2 太陽光の紫外線スペクトル

太陽光の紫外線スペクトルの測定結果をFig. 7に“FUKU”として示す。参考のため電子技術総合研究所の行った田無市における1979年2月9日の快晴時の11時10分と14時10分の天空光を含めた直射光の測定データ<sup>10)</sup>を同図に“TANA”として示した。11時台と14時台の両方とも波長400nm以下において1979年のものと絶対値、形状において類似しているのが、波長320nm以下の領域に関しては両方とも1979年のものより幾分値が高くなっているのが分かる。これは1979年の測定時より短波長域の紫外線が増加したことを意味するが、地表で観測される短波長限界は約290nmとされており、今回の測定器においては散乱光による測定誤差の影響や、センサの分光感度の形状による計算誤差の影響も考えられるため、紫外線の増加によるとの結論には至らなかった。

#### 4. 2. 3 LINAC施設周辺の紫外線スペクトル

LINAC停止時の紫外線スペクトルの測定結果をFig. 8に実線で示す。図では実験室を“Labo BKG”、中性子測定室を“TOF BKG”として示す。また同じ図にはLINAC稼働時の紫外線スペクトルの測定結果を破線で実験室を“Labo OPR”、中性子測定室を“TOF OPR”として示す。400nm以下に弱い紫外線が観測されるが、これは測定時中性子測定室においては白熱電球が点灯しており、実験室には太陽光が差し込んでおり、測定結果のスペクトルはこれらの光源によるものと思われる。図よりLINAC停止、稼働時におけるスペクトルの形状にはほとんど違いが見られず、LINACの稼働に起因する紫外線増加は見られなかった。

### 4. 3 紫外線被曝の安全評価

#### 4. 3. 1 相対分光有害作用と有害放射照度

波長320nm以下の紫外線が人間の目や皮膚に当たり、照射量がある限界値を越えると、その典型的な症状として目に対しては角膜炎、皮膚に対しては紅斑が起こる。このような症状をもたらす放射環境は労働衛生上避けるべきであり、わが国では1984年に新JIS8812「有害紫外放射の測定法」が制定されている<sup>11)</sup>。新JISでは相対分光効果特性(RSE)を $S(\lambda)$ 、紫外放射の分光分布を $E(\lambda)$ とした場合、有害放射照度 $E_{\text{eff}}$ を次式のように定義している。

$$E_{\text{eff}} = \int_{200}^{315} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (3)$$

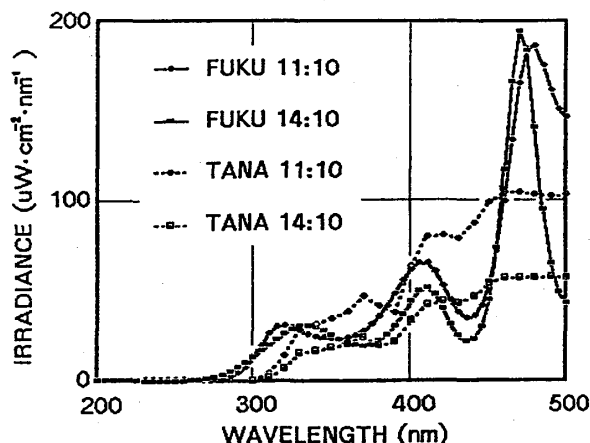


Figure 7. Spectra of the solar UVR. Solid and broken lines show the spectra observed at Fukuyama University in 1993 and those at Electro-technical Laboratory in 1979, respectively.

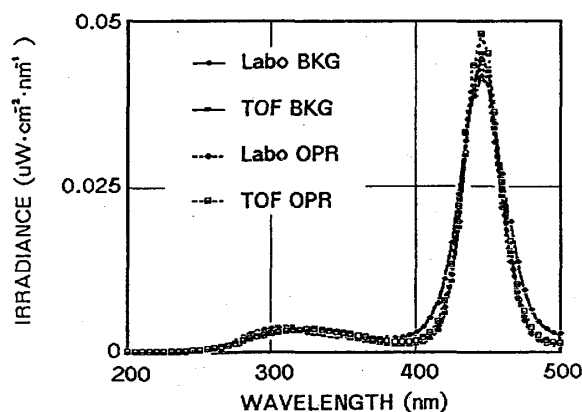


Figure 8. Spectra of UVR around the KUR linac facility.

眼に対する許容限界(TLV)は照射時間を  $t$  とした場合、 $E_{\text{eff}} \cdot t = 3\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$  ( $0.1\text{s} > t > 8\text{h}$ ) の関係で示され、文献<sup>12)</sup>によれば270nmの紫外線が最も有害であり、そこでの制限値を $3\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ と与えているのが分かる。このように紫外線の危険度は着目する作用によって相対分光効果特性や制限値が異なるため有害放射照度は紫外線スペクトルに基づき作用ごとに評価することが重要性である。

#### 4. 3. 2 環境紫外線の有害放射照度

環境における紫外線スペクトルに基づいて得られた有害放射照度と許容暴露時間をTable3に示す。生活環境では水銀ランプ、蛍光灯などで紫外線強度が強相対的に危険度の高い光源であることが分かる。特に体育館内の天井における水銀灯における紫外線が今回測定した生活環境内の光源の中で最も危険度が高くなっており直接水銀灯を見る行為はできるだけ少なくするなど注意を払う必要がある。しかしここで用いたスペクトル評価法では300nm前後で誤差が大きいことを考慮すると実際はこれらの値より幾分低くなるとも考えられ、今後の詳しい検討が必要である。

Table 3. Effective irradiance ( $E_{\text{eff}}$ ) and permissible exposure time (PET) for UVR against the peak of the spectral effectiveness.

	$E_{\text{eff}}$	PET
Fluorescence	0.74 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.1 hr
Mercury	4.78 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	10.5 min
Incandescent	0.16 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	5.3 hr
Fukuyama 11:10	1.22 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	24 sec
Fukuyama 14:10	1.42 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	21 sec
Generator	0.26 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	3.9 hr
Control	0.21 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	3.9 hr
Labolatory	0.07 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	11 hr
TOF	0.05 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	16 hr

太陽光については今回測定した環境中紫外線の中で最も危険度が高く、目に対しては相当注意を要することが分かる。田無市のデータと比較すると田無市の場合は290nm以下の紫外線が存在しないのに対し測定データでは存在しており、この測定でも散乱光の寄与など測定誤差を今後充分検討する必要がある。

LINAC施設周辺についてはマイクロ波発生装置室と制御室においては有害作用効果の著しい300nm以下の値が高く観測されたため、安全評価としては無視できない数値を得ている。一方、実験室と中性子測定室においてはTLVの8時間越えており労働時間内では充分安全であることが明かとなった。

## 5. 結 言

以上の検討の結果、フォトダイオードと金属干渉フィルタを組み合わせた多センサスペクトロメータについて以下のことが明かとなった。

(1) 本方法は250nm~400nmの波長範囲の紫外線スペクトルの測定に使用可能である。また、より狭い波長域にピークを有する紫外線に対しては適切な分光感度を持つセンサを追加することで精度の改善の可能性が示された。

(2) 操作性、可搬性を重視した試作検出器を使用して代表的な生活環境でのスペクトル測定を試みた結果、この方法により作業環境を含め多くの環境で紫外線スペクトル情報を比較的高い精度で明らかにできる可能性が示された。

(3) 紫外線被曝の安全評価法については、紫外線スペクトルに基づいて着目する影響の関連する全波長域を評価の対象とできるため、TLVの分光効果特性だけでなく他の分光効果特性を有する広範な影響評価の可能性が示された。

(4) 300nm近傍のスペクトル測定や散乱光を含めたスペクトル測定の精度の改善のためにセンサへの光

の入射条件等の工夫がいることが明かとなった。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり特性試験などご援助いただいた福山大学工学部電子電気工学科三宅成則君に感謝いたします。また、本研究で開発したスペクトロメータの応用測定では、共同利用研究の一環として京都大学原子炉実験所電子線加速器施設を利用させていただきました。関係各位に謝意を表します。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金一般研究(C)を得て行われました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 東堯：“わが国の紫外線研究の歩み”，照明学会誌，第57巻，第4号，pp.192-194 (1973)
- 2) 渡会吉昭：“紫外線光源”，照明学会誌，第57巻，第4号，p.212 (1973)
- 3) 島崎達夫：“成層圏オゾン”，第2版，東京大学出版会，pp.140-146 (1989)
- 4) 中川靖夫，大谷文雄，谷治 環，笛木広久，藪崎憲司：“有害紫外線照度計の開発”，照明学会誌，第69巻，第10号，pp.549-552 (1985)
- 5) グレン F. ノル：“放射線ハンドブック”，日刊工業新聞社，第2版，pp.730-732 (1991)
- 6) Golde L. Watkins, George R. Holeman; “The Evaluation of an Iterative Technique's Use in Unfolding Neutron Spectra Data”, Health Physics, Vol.15, pp.535-539 (1968)
- 7) 浜松ホトニクス：“半導体UVセンサG3614シリーズ”，浜松ホトニクス株式会社 (1991)
- 8) 光環境計量化調査専門委員会：“光環境計量化の動向”，第185号，p.65 (1985)
- 9) 松浦邦男：“照明の辞典”，朝倉書店株式会社，第2版，pp.30-33 (1983)
- 10) 羽生光宏，鈴木 守，長坂武産：“田無における太陽光の分光放射測定(III)”，電子技術総合研究報告，第830号，p.63 (1983)
- 11) 中川靖夫，大谷文雄，谷治 環，笛木広久，藪崎憲司：“有害紫外線照度計の開発”，照明学会誌，第69巻，第10号，pp.548-549 (1985)
- 12) JISZ2812：“有害紫外放射の測定法”，p.549，(1987)