研究論文

自然環境における紫外線放射照度の変動特性

占 部 逸 正^{*1}(1992年9月16日受理)
(1993年1月12日再受理)

Characteristics of Variation of UVR Irradiance in the Natural Environment

Itsumasa URABE^{*1}

It is very important to know characteristics of the variation of ultraviolet radiations (UVR) in the natural environment for planning radiation protection on the basis of quantitative risks of the UVR. From this point of view, observation of diurnal and annual variations in the natural environment has been carried out using a portable UVR irradiance meter from May 1991 to April 1992. It is quite possible from the diurnal variation that the UVB scattered in the sky become significant when the sun approaches the horizon and from the annual variation that UVB irradiances become weaker than expected ones in summer. It is apparent that the UVA scattered in the sky vary depending on the surroundings of measuring points and that remarkable seasonal variations can be seen in the UVB scattered in the sky.

KEY WORDS: irradiance, ultraviolet radiation, diurnal variation, seasonal variation, natural environment

I 緒 論

近年, 地球環境問題のひとつであるオゾン層の破壊に伴う太陽紫外線の増加が広く公衆の関心を集めている¹⁾。一方, 医学や教育面における紫外線利用とともに加速器を利用した紫外線～軟X線の工学的利用に伴う被曝の可能性が増大する傾向にある²⁾。産業活動の活発化によるこうした低エネルギー光子場の急激な変化は, その直接的, 間接的な影響により, これまで人類が経験した事のない生活環境を形成し, 新たな損害の原因となる可能性を有している。

太陽紫外線は低エネルギー光子のなかでも最も多くの公衆が被曝し, そのわずかな変化が大きな害を引起こす

可能性のある放射線である。人間活動による太陽紫外線強度の変化を合理的に制御するためには, 世界的視野に立った合意形成が不可欠である。しかし同時に, 太陽紫外線による影響の現れ方が人種や地域によって異なることを考慮すると³⁾, 有害な影響を制限するための工学的手法を検討することやその国や地域特有の紫外線変動に関する基礎的情報を整備しておくことが安全対策を具体化するうえで重要である。

我が国では皮膚ガンが発生率, 発生部位, 致死率などが諸外国のそれらに比べ大きく異なっているが^{3,4)}, その発生率は明らかに緯度効果を示しており紫外線強度との関連が示唆されている^{5,6)}。紫外線被曝の増大により生じる悪影響を効果的に排除するためには, 影響の入力量となる太陽紫外線強度の変動特性を知り, これまでに生じた悪影響との関連性を調べ, その防護方法を検討することが重要である。

^{*1} 福山大学工学部; 福山市東村町三蔵 985 (〒729-02)
Faculty of Engineering, Fukuyama University;
985, Sanzo, Higashimura-cho, Fukuyama-shi, 729-02, Japan.

ここではこうした視点に立ち、自然環境中で観測される UVA, UVB の紫外線に着目し基礎データのひとつである年間の紫外線強度の変動およびそれぞれの成分の強度の方向分布を測定し、UVA, UVB 強度の変動要因、直射光と散乱光の変動特性などの検討を行った。

II 実 験

2.1 紫外線照度計の応答

紫外線照度の測定には DIX-300 と DIX-365 センサおよび DRC-100X データ表示器（いずれも Spectronics Corporation 製）を使用した。この測定器の分光感度特性や検出感度などの基礎特性はすでに一部報告した⁷⁾。Table 1 には太陽紫外線を区分する際に WHO が採用している波長区分域⁹⁾と今回使用したセンサの分光感度の中心波長および半値幅を示した。表より、中心波長は UVB の場合に WHO の示した波長域の中心より 5 nm ほど短波長側にずれており、また半値幅は UVA の場合 40% 程度、UVB の場合 10% 程度 WHO のそれらより狭くなっていることがわかる。

これらの検出器で太陽紫外線を測定した場合、得られる出力（放射照度）は検出器分光感度特性と入射光スペクトルの積で得られる。太陽光のスペクトルは地球を取巻く大気の状態により著しく異なるが、地上で観測された分光測定結果⁹⁾に基づいて放射照度を計算すると DIX-300 センサでは 320 nm に、DIX-365 センサでは 370 nm 近辺で放射照度としての出力の最大値が得られた。大気中のオゾン量の変動に伴う紫外線強度の変動は短波長側での変化率が著しいため、放射照度への相対的寄与は紫外線のオゾン層透過距離に依存する。しかし、ここではオゾン量の季節変化や太陽高度の相違により紫外線のオゾン層透過距離が異なっても、UVA 領域は 370 nm、UVB 領域は 320 nm 近傍の紫外線の寄与が放射照度の中心をなすものと考えた。

Table 1 Wavelength ranges of UVA and UVB and FWHM (full width at half maximum) of the DIX-300 and the DIX-365 UVR sensors used here.

	WR (nm)	WHS (nm)	FWHM (nm)
UVA	320-400	362	335-383
UVB	280-320	295	277-312

WR : Wavelength range introduced by the WHO.
WHS : Wavelength at the highest sensitivity.
FWHM : Full width at half maximum.

以上のように DIX-365, DIX-300 センサは UVA, UVB を測定するうえでいくつかの制約を有するが、本報告ではこれらの検出器による測定結果をそのまま UVA, UVB による放射照度と記して取扱うこととした。

2.2 太陽紫外線の測定

年間を通して見られる太陽紫外線の変動特性を知るために、測定は 1991 年 5 月から 1992 年 4 月に実施した。測定場所は測定環境の相違を考慮して福山大学構内の 4 号館前広場（以後 4 号館前と呼ぶ）と、これより数百メートル離れ周りが樹木で囲まれた芝生上（以後芝生上と呼ぶ）を選択した。測定時刻は 13 時前後とし、センサを地上約 1 m に固定しその受光面が太陽光線と垂直となる条件で行った。また大気中や周囲の環境からの散乱光の様子を知るために、太陽光線に垂直な面のみならず地表面に対して垂直な面で東西南北の方向の放射照度も測定した。測定の頻度は当初予定した週 2 回が気象条件、作業条件により多少変動したが、これは長期的変動傾向を知るうえで大きな問題とはならなかった。

また、UVA, UVB の日変化の様子を知るために夏期～冬期の晴天時に大学構内、海岸、小さな街の近郊などのいくつかの地域で 1 日に複数回の測定を行った。測定日によって測定時刻、測定の時間間隔が異なったが、午前、午後の変動傾向が把握できるよう測定を実施した。日変化の測定はいずれもセンサ受光面が太陽光線に垂直となる条件で測定した。

全体の測定を通して測定値は安定しており 1 回の測定結果を得るのに表示された数値を平均するなどの統計的取扱いはいり必要であった。

III 結果および考察

3.1 放射照度の場所による相違

DIX-365 および DIX-300 センサを用いて 4 号館前で測定した結果と芝生上で測定した結果の相関図を Fig. 1 に示す。図では横軸が芝生上の放射照度 (I_{La})、縦軸が 4 号館前の放射照度 (I_{Bu}) を表し、白丸、黒丸はそれぞれ UVA, UVB の測定結果を表している。また図中の直線は 4 号館前と芝生上が同じ測定値となる場合の関係を示している。Fig. 1 から白丸、黒丸ともに測定値の多くが直線の近傍に分布しているのがわかる。これは測定場所の移動を考慮すると、場所による系統的な相違がなく、主に測定場所の移動に伴う測定時刻のずれにより生じたものと思われる。この結果から、受光面を太陽光線に垂直に向けた測定では、緯度が大きく異なるか大気の状態が急激に変化しない限り数百 m 離れた地点での放射照度の相違は極めて小さいと考えられる。

Fig. 1 Relation between I_{Bu} (irradiance observed around No. 4 building) and I_{La} (irradiance observed above the lawn surrounded by trees). Solid and open circles show the results measured by the DIX-300 and the DIX-365 sensors, respectively.

3.2 放射照度の年変化

3.2.1 年変化と大気層による減衰

UVA および UVB による放射照度の変化を **Fig. 2** に示す。測定値に場所による系統的な差異が見られなかったため、**Fig. 2**では4号館前の結果のみを示した。図では上段に UVA、下段に UVB の結果を示した。図中で測定結果が大きくばらついているのは測定時の天候によるもので、晴天時と曇天時で 70~80% の差異の生じる場合も見られる。また図中の三角印は比較的条件の類似したスペクトルに今回用いた放射照度計の分光感度特

Fig. 2 Variation of UVR irradiances observed in Fukuyama University from May, 1991 to April, 1992. Solid and open circles represent UVB and UVA irradiances, respectively. Broken lines show the results calculated on the assumption that the UVR was mainly decreased by the Rayleigh scattering and absorption by air and ozone.

性を乗じて評価した結果を示している。ここでの計算に使用したスペクトルは 1977 年田無市における測定結果⁹⁾であるが、年変動はいずれの波長の場合も類似した傾向を示している。

紫外線の地表面附近における強度は空気分子、水蒸気、浮遊塵等による散乱、吸収により著しく変動する。ここで着目した、UVA、UVB 領域の紫外線は前者が主に窒素や酸素の大気分子による散乱を受けるのに対し、後者はそれとともにオゾンによる吸収の影響を強く受ける。観測点における太陽の位置の天頂角を z とすると、地表面における波長 w の紫外線の放射照度 I_w は

$$I_w = B_w(z) I_{w,o} \exp[-\sum (\sigma_i^a + \sigma_i^s) N_i \sec z]$$

B_w : 紫外線の大気中での再生係数

$I_{w,o}$: 大気層入射直前の放射照度 (W m^{-2})

σ_i^a : オゾン等による紫外線吸収断面積 (cm^2)

σ_i^s : 空気分子等による紫外線散乱断面積 (cm^2)

N_i : 真上方向の大気成分 i の分子数 (cm^{-2})

で表される。大気外観測スペクトル¹⁰⁾を使用し、地表面附近の放射照度の計算結果を **Fig. 2** に破線で示した。ここで使用したオゾンの吸収断面積および空気分子によるレーリー散乱断面積は文献^{9,10)}により求めた。さらに空気分子数は1年を通して一定とし、オゾンは季節変化を考慮した¹⁰⁾。また B_w は散乱光の寄与分で大気の状態や太陽高度に依存する。特に後者に関しては 320 nm の紫外線に対し 2~5 程度になるが¹¹⁾、ここで使用した検出器の感度の方向依存性が $\cos$ 分布をしており光の入射角度により寄与が小さくなること、 B_w の変化の詳細が得られなくても年間の変動傾向の概略は把握可能であることなどの理由によりここでは 1 とした。計算による推定値は多くの仮定に基づく直射光の変動を示すが、測定値と計算値はいずれも夏期に強度が強く冬期に弱くなる類似した年変化を示すことが図より明らかである。晴天時の観測値で UVA と UVB の測定結果を比較すると、前者の場合 12 月前後の強度が 6 月前後の約 50% であるのに対し、後者では約 30% と大気層透過距離依存性の著しいことがわかる。また夏期に比べ冬期に天空光の割合が大きいことを考慮すると¹¹⁾、特に UVB の場合、冬期の放射照度は大部分散乱光によると考えられる。このように UVB の強度は大気層の透過距離に強く依存するため紫外線放射照度の変動を検討するうえでオゾン量の変化とともに太陽の位置の相違を考慮することの相対的重要性が明らかとなった。また図で 1992 年 1 月に特に UVB の場合に顕著に放射照度の一時的な上昇が見られるが、この時期の大気圧は 1,020 hPa 前後であり大気層の厚さの急激な変動以外の原因による直射光

の増加を示唆している。

3.2.2 放射照度の相対比較

上で得られたUVA と UVB の測定結果の比を Fig. 3 に示す。図中の白丸は晴天時の結果を、破線は前述の空気分子のレイリー散乱およびオゾンの吸収を考慮した計算結果の比を示す。図より放射照度の比の値 (I_{365}/I_{300}) は気象条件により異なり、曇天時は晴天時に比べその値が小さくなる傾向が見られる。また晴天時の測定結果では5月から7月にかけて小さい値となり12月から2月にかけて大きな値となる傾向がみられる。計算結果を参考にとすると夏期に測定値と比較的よく一致し、冬期に計算値より低い値となる傾向が見られるが、これは UVB の天空光の寄与が冬期に増加することを裏付けたものと言える。また8月～9月にかけて破線より上に測定値が見られるが、これは UVB が直射光のみの場合より小さくなる傾向にあり天空光の寄与では説明できないため、他の要因、例えば、UVB が夏期に大気浮遊物質等の影響を比較的強く受ける可能性のあることなど、その原因についての今後の検討が必要である。この時期のこうした傾向は6月～7月の梅雨期を含め、紫外線の強くなる夏期の天然の防護機構を示唆するだけに重要と思われる。

3.3 放射照度の日変動

UVA および UVB の日変動の測定結果を、それぞれ Fig. 4(a), 4(b) に示す。図では横軸に測定時刻を示す。図中の日付は測定日を表す。測定時刻が測定日より異なり、また測定結果も測定日の大気状態によりばらついているが、図より7時～18時のおよその変動傾向の把握は可能である。全体の測定結果から夏期の7時すぎに

Fig. 3 The ratio of UVA(I_{365}) to UVB(I_{300}). Open circles represent the irradiances obtained in fine weather. A broken line shows the ratios derived from the calculated data shown in Fig. 2.

Fig. 4(a). Diurnal variation of the UVA irradiance determined by the DIX-365 sensor. Numbers in the figure show the dates when the measurements were carried out.

Fig. 4(b). Diurnal variation of the UVB irradiance determined by the DIX-300 sensor. Numbers in the figure show the dates when the measurements were carried out.

はすでに相当強い紫外線が存在すること、12時前後に最大値が見られること、季節によって強度が著しく異なることなどが明らかである。また UVA, UVB の結果ともに午前10時～午後2時の間に1日の50%～60%の照射量を与えている。この割合は季節によっても異なるが、従来から言われている割合とも比較的よく一致している⁸⁾。

Fig. 5 に前節と同様に UVA と UVB の測定値の相対強度の変化を示す。図中の日付は測定日を表す。図よりいずれの場合も正午に最低値の現れる傾向が見られる。これは前節で検討したように太陽高度が最大の時そ

Fig. 5 The ratio of the UVA (I_{365}) irradiance to the UVB (I_{300}) irradiance. Numbers in the figure show the dates when the measurements were carried out.

それぞれ強度の最大値が得られ、太陽高度が下がるに従い UVB の測定結果が大気による散乱やオゾンによる吸収を強く受けるためである。さらに **Fig. 5** からオゾンによる吸収が最大となる時刻が夏期には 16 時すぎ、冬期には 15 時前になる傾向が見られる。また図では最大値が得られた後また小さくなる傾向がみられるが、これは太陽の高度がさらに低くなると太陽と観測点を結ぶ線上の大気層の厚さが増大し、波長の短い紫外線に対する散乱の影響が増大したことによるものと思われる。即ち、370 nm を中心とする紫外線に比べ散乱断面積の大きい 320 nm 近傍の紫外線は上層で何度か空気分子と衝突して観測点に到達する割合が大きくなり、観測点に達した紫外線の実質的なオゾン層透過距離が短くなったことによるものと思われる。

3.4 放射照度の方向分布

Fig. 6(a), 6(b) に UVA と UVB による放射照度の方向分布の測定結果を示す。図では細線で 6 月、太線で 12 月の結果を示し、破線が 4 号館前、実線が芝生上で得られた結果を示す。図より UVB の結果では 6 月と 12 月の測定結果に大きな開きがあるのに対し、UVA の結果では南方を除いてその差の比較的小さいのがわかる。このことは UVB では直射光も散乱光もほぼ同様に 12 月頃小さくなることを示している。また 6 月の結果に着目すると、3 方位では 4 号館前と芝生上の結果が類似した傾向を示すが、東方で特に UVA の結果に著しい場所による相違が見られる。これは UVB の結果にそれほど違いが顕れていないことを考慮すると、前者の場合建物（4 号館）による天空光の遮光とこれによる散乱光が相補いあって観測されているのに対し、後者では建物による散乱光の寄与が小さく遮光の影響が強く現れたためと考えられる。またいずれの結果でも 12 月に南方で放射照度が強く観測されているのは、太陽高度が低いことに起因して直射光が寄与したためと思われる。

Fig. 6(a). Directional distributions of the UVA irradiance. Solid and broken lines show the results observed around the No. 4 building and above the lawn surrounded by tress, respectively. Thin and thick lines represent the results obtained in June and December, 1991, respectively.

Fig. 6(b). Directional distributions of the UVB irradiance. Solid and broken lines show the results observed around the No. 4 building and the results above the lawn surrounded by tress, respectively. Thin and thick lines represent the results obtained in June and December, 1991, respectively.

このように散乱光に着目した紫外線放射照度の方向分布から、季節による相違は UVB に強く現れ、環境条件による相違は UVA に強く現れるなど波長により散乱光

の寄与が異なることが明らかとなった。特に UVB で夏期に散乱光強度が強くなると同時に周囲の影響が現れにくくなる傾向が見られたのは、効果的な防護対策を検討する上で重要で、今後環境紫外線の方角分布に関する更に詳しい検討が必要になるものと思われる。

IV 結 論

以上の検討の結果、次のことが明らかとなった。

(1) 季節変化の測定の結果、6～7月に最大値、12～1月に最小値が得られ、晴天時の放射照度で夏期に対する冬期の割合は UVA の場合約 50%、UVB の場合約 30% で、特に後者で太陽の位置の相違による変化の著しいことが明らかとなった。

(2) UVA、UVB の強度比の変化およびその推定値との比較から、夏期に UVB の強度が相対的に弱くなる傾向が示され、夏期の気象条件が季節変化の地域の特徴を決める要因のひとつとなる可能性が示された。

(3) 紫外線は正午に UVB の強度が特に強くなり、午前 10 時～午後 2 時に 1 日の 50%～60% の照射量を与える。また太陽高度が低くなると上空での散乱に起因して UVB の寄与が相対的に大きくなることが示唆された。

(4) 直射光では場所による強度差がほとんど見られない。一方、散乱光は季節や環境条件に依存し、UVA では季節変化が比較的小さいが建物など周りの影響を受けやすいこと、UVB では季節変化は大きいが周りの影響をあまり受けないことが明らかとなった。

本研究の遂行にあたり多大な御援助を頂いた福山大学工学研究科岩本明憲氏および福山大学工学部土屋大輔、山下喜代実両氏に謝意を表します。また本研究の一部は文部省科学研究補助金（一般研究(C)）を得て行われたものです。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 和田 武；“地球環境論”，pp. 23-61，創元社，大阪（1991）。
- 2) 日本保健物理学会加速器放射線防護委員会；加速器放射線防護の現状，日本保健物理学会（1990）。
- 3) ICRP；The biological basis for dose limitation in the skin, *Annals of the ICRP*, ICRP Pub. 59, pp. 56-83, Pergamon Press, Oxford (1991)。
- 4) T. MIYAJI；“Biology of Cutaneous Cancer,” *Nat. Cancer Inst. Monograph*, No. 10, pp. 55-70, Philadelphia (1962)。
- 5) 三木吉治，藤浪得二；皮膚癌，医学のあゆみ，79(7)，おぼえがき（1971）。
- 6) H.F. BLUM；Sunlight as a causal factor of the skin of man, *J. Nat. Cancer Inst. U.S.*, 9, 247-258 (1948)。
- 7) 占部逸正，竹屋章史，中田 尚；可搬型紫外線照度計の特性試験と環境測定への応用，福山大学工学部紀要，14, 20 (1992)。
- 8) WHO；Ultraviolet radiation, *Environmental Health Criteria*, 14, p. 20 (1979) WHO, Geneva。
- 9) 羽生光宏，鈴木 守，長坂武彦；田無における太陽光の分光放射測定（Ⅱ），電子技術総合研究所研究報告，第 813 号，pp. 118-207 (1981)。
- 10) 島崎達夫；“成層圏オゾン”，pp. 14-42，東京大学出版会，東京（1989）。
- 11) 渡会吉昭；太陽光および人工光源の紫外線と赤外部の放射特性，電気学会光源・関連装置研究会資料，LS-77-5, p. 1 (1977)。