■資料■特集 光環境の基本要素である光について今改めて考える
かつては UV-C もあった

光環境とUV

Earth Was Once Exposed To UV-C : UV In The Photo-Environment

◀キーワード：UV, UV 作用, UV 環境, 太陽 UV-B, 人工光源, オゾン層

1961年東京理科大学、
東海大学開発技術研究
所教授、工学博士。専門
は応用光化学、生命と
光にかかわる科学が主
テーマ。太陽 UV 放射
計測研究もその一つ。

正会員 佐々木 政 子
Masako Sasaki

1. はじめに

目に見えない光《UV：厳密には紫外放射》は、太陽光や人工光源からの光に不可分の含まれている。このため、我々は日常生活の中で様々な UV 作用の恩恵と害を受ける。蛍光灯の明るさは UV 作用で生まれるが、その放射中の僅かな UV が人の皮膚に光線過敏症¹⁾を起こすこともある。戸外での気持ちのよい日光浴は、ビタミン D₃を光合成し、カルシウム代謝を促すが、度を過せば UV 発癌の引き金となる。UV はあらゆる生命体、物体、生態系に益と害の両刃の剣となる。

本稿では、まず UV 光子の作用について述べ、さらに、UV 発生源—太陽と様々な人工光源が創り出す UV 環境を概観し、UV の人体作用にも簡単にふれる。

2. UV 光子の作用

UV は可視放射の紫より波長が短く、X線より波長の長い400—10nmの電磁波である。照明学会用語集に UV と関連用語の概念が定義されているが、研究分野によっては異なる波長域分類が使われることもある（図1）。UV はその大きい光子エネルギーによって光電効果を示したり、照射物体に化学反応を誘起するポテンシャルをもつ。UV の化学作用は、Ritter が塩化銀の黒化反応を利用して UV を発見し²⁾、Lyman がシューマン乾板を使って水素原子の UV スペクトルを発見した事実³⁾に象徴されている。UV の化学作用は農水産業では自然の恵みとして受け入れられてきたが、産業への積極的な利用

は1800年代の初期に写真や製版技術で始まり、現在では塗料硬化、水殺菌や水処理、化学物質の光合成や耐光試験、半導体工場における光洗浄、植物育成工場、気象・天文分野のリモートセンシング⁴⁾など多岐に亘っている。医学分野においても UV 利用の歴史は古く、Finsen は真性皮膚結核の UV 治療で1903年度ノーベル医学生理学賞を受賞している。また、難治性皮膚疾患への光化学療法は現在なお精力的に研究されている⁴⁾。さらに、UV 作用で物質から放出される蛍光は、衣服や室内装飾の一属性と見なされる場合もあり、偽札や宝石の鑑定、美術品の診断などにも使用され、最近では舞台照明、テーマパークや蛍の庭園の演出照明に巾広く利用されている。

3. 太陽と人工光源がつくる UV 環境

3.1 太陽 UV 環境と成層圏オゾン層

1980年以降、南極上空、特に春季に化学的な過程によるオゾン層破壊が進行している。昨年10月にはオゾンホールは観測史上最大と報じられた⁵⁾。

成層圏オゾン層の破壊について簡単にまとめておこう。成層圏オゾン層は地球上層の約10—50kmにある大気圏の中程にあるオゾン濃度の高い帯域を指す。大気を地球表面に集め標準状態に圧縮すると、大気の厚さは8kmとなりオゾン層の厚みは僅か3mmとなる。オゾンのUV吸収波長域は生命体の遺伝子DNAのUV吸収域にほぼ重なる（図2）ため強力な太陽UVから我々陸上の生命体を遮蔽している。まだ、オゾン層が形成されず

UV : ultraviolet radiation

化学・物理学 波長区分	vacuum UV 真空紫外	far UV 遠紫外	near UV 近紫外		可視域 →
放射計測 生体影響	人工 UV 放射領域			地表到達太陽 UV 領域	
生物学・医学 波長区分 主な作用		UV-C 殺菌作用	UV-B 日焼け作用	UV-A 化学反応	
波長 (nm)	10	200	290	300 320	400

図1 UVの波長区分と名称

図2 オゾンとDNAのUV吸収スペクトル
(A. J. Blake and J. H. Carver, The Evolution Role of Atmospheric Ozone, 1977 p.720)

UV-Cが地上に届いていた頃、生命体が水中で誕生した。オゾン層は地球の誕生から約40億年の歳月を掛けて地球上に徐々に形成され、約4億2000万年前に陸上に生命体が生存できるようになった(図3)⁶⁾。しかし、最近の僅か20年の間に、成層圏オゾン層は全球平均で-3.4%/10年の割合で減少の傾向にある⁷⁾。人間の利便性の追求と繁栄の代償にしては大きすぎるのではないだろうか。

図3 地球における酸素とオゾンの生成と生物の進化
(R. P. Wayne, Chemistry of Atmospheres, 1985 p.338)

ここで、太陽から地上に届く放射スペクトル(図4)を見てみよう。400nmより短いUVが全太陽放射に占める割合が如何に僅かな量かお解り頂けよう。UVは大気圏を通過する間に、成層圏オゾンのHartley帯(200-300nm)に強く吸収され、さらにHuggins帯(300-340nm)で減弱されるため、300nmより短い波長成分は地上に達しない。しかし、フロン等によるオゾン層破壊がこのまま進み、地球上空からオゾンのベールが消失したら地上の生命体はどうなるであろうか。太陽からのUV(主としてUV-B、UV-Cが加わる可能性もある)が遺伝子DNAを直撃し、UV-BやUV-Cを吸収した生命体は突然変異、傷害を起こし死滅の道を辿ると予

図4 大気圏外と地上の太陽波長別放射強度分布

図5 オゾンの減少に伴う地上の太陽スペクトルの変化

測される。現在のオゾン全量320DUを基準にとって、290-400nmのUVの地上変動を見積もり図5に示す。この図から成層圏オゾンの減少で増加するのはDNAに損傷を与えるUV-Bだということがよく判る。さらに、オゾン全量が現在より10%減少した場合、300nmより短いUVが地上に到達しはじめ、290nmのUVは現在の3倍強になると推算される。UV-Bの人体への影響は、地上に届く太陽スペクトルと後で述べる日焼け作用スペクトルや目への有害作用スペクトルとの積で見積もられる。オゾン全量が現在より10%減少した場合、日焼け作用は14%、目への有害作用は22%増加すると見積もられる。

3.2 太陽UV-Bの計測と解析

成層圏オゾン層の減少は図5に示したように、地上のUV-Bを疑いなく増加させる。しかし、オゾン層破壊が現実となる以前、日本をはじめ諸外国でもUV-B測定はさほど重要視されておらず、また、測定器も開発されていない状況にあった。変動する全太陽放射の中から1%にも満たない僅かに30nmの波長域のUV-Bをノイズ無しに取り出すのは大変難しい。著者らは光化学と光生物学の研究途上で、帯域分光型の太陽UV-B計測器を開

発し⁸⁾⁹⁾、1990年以降太陽 UV-B の連続観測を平塚 (35° N, 139° E) で行ってきた¹⁰⁾¹¹⁾。一方、カナダでスペクトル分光型の Brewer ozone spectrometer が開発され、気象庁ではこの両測定器を使って1990年に UV-B の観測を開始し、1991年からは後者の測定器を札幌、つくば、那覇、鹿児島に設置し、UV-B 観測データをオゾン観測データと共に公表している¹²⁾。なお、欧米では人の日焼け作用スペクトルを分光感度とする紅斑線量計 (Robertson-Berger meter) が普及している。

オゾン層の減少が世界各地の測定から明らかになっているにも拘わらず、これにリンクするはずの UV-B の地上での増加の実態は依然として殆ど明らかにされていない。1994年までに行われた世界各国の太陽 UV-B の長期観測結果を表 1 にまとめた。スイスのユングフラウ山頂、カナダのトロント、我々の観測地点平塚で、統計学的にも有意な太陽 UV-B の増加傾向が観測されている。

以上の観測結果は、NASA の人工衛星に搭載された TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) で1979

年から1992年に観測された人間活動が集中している北緯30-60度での減少トレンド¹³⁾と良い相関を示している。このことは、南極以外でもオゾン層の減少に伴う UV-B の増加がはじまっていることを示唆している。

ここで、我々の観測で明らかにされた太陽 UV-B の日射や UV-A とは異なる放射特性を 2, 3 ご紹介しよう⁹⁾¹¹⁾。UV-B の特性を知ることは今後の UV 対策に役立つはずである。図 6 に UV-B, UV-A と日射の日内変動を示す。UV-B は一日の変動巾が非常に大きく、雲や天候に敏感に応答する。また、図は省略するが季節変動を比べてみると、日射や UV-A は冬と夏の差がたかだか 2 倍程度であるのに、UV-B は冬と夏で 5—6 倍の強度差を示す。UV-B は春先から初秋まで、晴天時の放射強度は夏と殆ど同程度である。日中は、夏は元より春も秋も UV-B にご用心である。ここで、我々の実測 UV-B を使って、日焼けを起こす時間の季節変動を見積もってみた(図 7)。図 8 と併せて、戶外活動の参考にして頂ければ幸いである。さらに、UV-B は大きい散乱性を特徴

表 1 太陽紫外放射 UV-B の観測地点と長期変動の観測結果

	測定器 (測定波長域)	観測地点	観測期間	長期変動の観測結果
1	R-B meter (290—330nm)	アメリカ 8カ所	1974—1985	減少 (0.5から1.1%)
2	R-B meter (290—330nm) 干渉フィルター分光 (290—325nm, 5nm 間隔)	スイスアルプス	1981—1989 1985—	増加 (1.1±0.4%) 不明
3	モノクロメーター	スイスアルプス		不明
4	ダブルモノクロメーター	ノルウェー	1987年春	不明
5	ダブルモノクロメーター	ニュージーランド	1980, 1988	307nm の放射照度が増加 (2 ± 8%)
6	SED240/ACTS270/W (紅斑曲線に近似)	ニュージーランド 4カ所	1989—1991	不明
7	ダブルモノクロメーター	南構大陸	1988年春	不明
8	R-B meter (290—330nm)	スウェーデン	(1989)	不明
9	ブリュワー	スウェーデン	(1983—)	不明
10	ダブルモノクロメーター	日本 (電総研)	1976—1979	不明
11	ブリュワー	日本 (気象庁)	1990—	不明
12	MS-210W (290—320nm)	日本 (東海大)	1990—	増加 (3.3%/年)
13	ブリュワー	カナダ	1989—	300nm の放射照度が冬に増加 (35%/年)

1. J. Scotto et al., Science, **239**, 762-764, (1988).
2. M. Blumthaler and W. Ambach, Science, **248**, 206-208, (1990).
M. Blumthaler and W. Ambach, Photochem. Photobiol., **54**(3), 429-432, (1991).
3. WMO, Project report of the meeting of experts on UV-B monitoring and research, World Meteorological Organization, 1977.
4. K. Henriksen et al., Atmos. Environ., **23**, 1573-1679, (1989).
5. A. Bittar and R. L. McKenzie, J. Geophys. Res., **95** (D5), 5597-5603, (1990).
6. G. J. Smith et al., Photochem. Photobiol., **57** (3), 513-517, (1993).
7. D. Lubin and J. E. Frederick, Geophys. Res. Lett., **16** (6), 1989.
8. W. Josefsson, Testing of the MED-meter and a proposal of a solar UV-network in Sweden, SMHI Meteorologi, 1990.
9. W. Josefsson, SMHI RMK, Nr 53, 1986.
10. 羽生他, 電子技術総合研究所研究報告, 第812, 第813, 第830, 1981, 1981, 1983.
11. 伊藤他, 研究時報**43**(5), 213-273, (1991).
12. M. Sasaki et al., J. Geomag. Geoelectr., **46**, 827-834, (1994).
13. J. B. Kerr and C. T. McElroy, Science, **262**, 1032-1034, (1993).

とする。UV-B 観測が開始される前、UV-B は散乱性が大きいから測定はできまいとさえ言われた。測定してみるとなるほど UV-B の散乱性は大きく、快晴でも60%以上が散乱成分であることがはっきりした。晴れの日 UV-B 防御には直射成分だけでなく、散乱成分をカットする気配りがポイントとなる。

図6 太陽 UV-B, UV-A, 日射の日内変動

図7 UV-B によって日焼けを起こす時間の季節変動 (MED: 最少紅斑量という。肉眼で赤みが認められる程度の日焼けを起こすのに必要な最小照射量)

真っ赤な日焼けは、肌のやけど。免疫力も低下する。肌が真っ赤になるような日光浴は、危険信号。日中の海岸で普通の肌は直射 UV20分程度がこの目安。日光浴は、ほどほどに。

図8 UV とつき合う法

3.3 人工光源の UV 環境¹⁴⁻¹⁶⁾

UV 人工光源は様々な分野で日常的に使われる。人工光源環境と太陽 UV 環境の大きい違いは、290nm より短い UV 環境が容易に創り出されることである。かつて地上に届いたといわれる UV-C の環境は造作なく再現できる。以下に、代表的な UV ランプを発光分布と共にご紹介しよう (図9)。

UV (170-400nm) 分光測光用には、通常重水素放電管が使用される。キセノンショートアークランプは、最近ソーラーシミュレータとしてニーズが高いが、太陽の可視放射を再現する人工光源として開発されたものなので、高輝度が得られる反面 UV-B 域の劣化が早いという欠点がある。水銀ランプは水銀蒸気圧によって分光分布が異なるから、用途に応じて使い分けができる。低圧水銀ランプは殺菌灯として知られ、253.7nm の単色光源として利用できる。高圧および超高圧水銀ランプは365nm に発光極大を持ち、強力な UV-A 用光源として利用さ

れる。蛍光灯型の UV ランプは使い勝手がよく一般に普及している。代表はブラックライトで、300-400nm (ピーク波長355nm) 域を高効率に発光し、金属仕上げ面・鋳物・繊維製品・織物などの検査、鉱物・宝石などの選別、美術品鑑定、舞台・遊技場の照明、光化学療法などに使用される。波長280-320nm を放射する健康線ランプは、日光浴の代用光源として使用されたこともあるが、UV 発癌の危険性もあり現在では医用あるいは研究用である。白色蛍光灯や昼光色蛍光灯からも僅かな UV が放射されている。UV に敏感な物体などでは UV 直射を避ける工夫がある。UV レーザー光源には簡便に使用できるものは今のところ無い。人工光源の開発は日進月歩である。しかし、高輝度ハロゲンランプで発癌するというニュース¹⁷⁾はまだ記憶に新しい。人工光源の安全性に加えて、UV 環境基準の設定が望まれる。

図9 各種のUVランプの発光スペクトル特性

UV放射源を使用する際に必要な放射量測定については他にゆずる¹⁸⁾。通常、物理測定法、化学測定法、生物測定法が目的に応じて使い分けられる。測定に際しては、測定に必要なのは相対値か絶対値か、瞬時値か積算値かなどを考慮して、最適分光感度、直線的応答度、精度などに対応可能な測定器を選択して、迷光や雑音の除去に心がけねばならない。実時間測定に向く市販UV照度計については戸沢の報告を参照されたい¹⁹⁾。

4. UV作用スペクトル²⁰⁾

生体に対するUVの有益作用はビタミンD₃の光合成が古くから知られている。しかし、UV光子の大きいエネルギーは時として、人体や物体に有害作用をもたらすことがある。前節までに述べたUV環境で作業する場合、UV作用から自身を守る工夫が是非とも必要である。UVが物体に引き起こす作用効果量を、単位時間に作用する放射の波長関数として表現したものが作用スペクトルと呼ばれる。日焼け(標準紅斑)の作用スペクトルがCIE(国際照明委員会)によって提案されている²¹⁾(図10)。過度の日焼けは皮膚癌を誘発する原因ともなる。また、人の目の角膜や結膜に対する許容被曝値の作用スペクトルは、米国政府産業衛生官会議(ACGIH)の勧告値が国際的に活用されており、日本ではJISとして制定されている(図11)²²⁾。この値は国際放射防護協会(IRPA/

図10 人の日焼け(標準紅斑)の作用スペクトル

図11 人の目の角膜または結膜に急性の傷害を与えるUVの相対有害作用スペクトル

INIRC)でも採用されている。2節でもふれたように、これらの作用スペクトルと環境のUVスペクトルの積が、皮膚および目に対する生体影響となる。UV環境下での作業や戸外でのUV被曝限界値としての参照が望まれる。なお、最近は美術館などの展示場でもUV照明をよく見かけるが、展示スペースでのUV環境の見直しもそろそろ必要であろう。太陽UV-Bは増加傾向にあり、我々が人工光源でUVを被曝する機会はむしろ多くなっている。しかし、UV作用スペクトルは、前記した以外ではDNA損傷スペクトルを除いて殆ど判っていない。これはUVの測定基準が未だ確立されていないことに加え、単色性の良い、安定したUV光源と高精度が得られる測定系が構築できにくいという事情などによっている。UV環境の変動把握と同時に、作用スペクトルの測定は今後の重要課題の一つである。

5. おわりに

昨年は UV 環境にとって意味深い年であった。1995年度のノーベル化学賞が Rowland, Molina, Crutzenらの“オゾンの形成と分解に関する大気化学の研究”に与えられ、PL 法が7月1日から実施に移されたからである。Molina と Rowland はフロンが成層圏のオゾンを破壊するという予測を1974年に公表し²³⁾、Crutzen は1970年に窒素酸化物によるオゾン層破壊を警告した。残念なことに、彼等の理論的予測は約10年後に見事に実証されることになった。人類にとって、現在のオゾン層破壊が恒常化することは何としても避けねばならない命題である。各国では現在、毎日の UV 予報も計画され始めている²⁴⁾²⁵⁾。かつてあった UV-C がまた地上に届くことのないように、我々人類は自らの生き方を問われていると思う。PL 法の実施は、ある意味で UV 光源メーカーに安全性の高いランプの供給を一層確実なものにする好機を与えた。照明学会でも UV 関連の各種研究調査委員会が活動している。我々は環境要素としての UV に一層の関心を払い、利便性や快適さだけを目的とせず、あらゆる生命の尊さを第一とする豊かな明日のための UV 環境を実現したいものである。

参考文献

- (1) 佐藤吉昭編, “光線過敏症”, 金原出版 (1991).
- (2) J. W. Ritter, Gilbert Annalen der Physik, 7, 527-528 (1801).
- (3) R. E. Huffman, “Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing”, Academic Press, INC. (1992).
- (4) J. D. Regan and J. A. Parrish, “The Science of Photomedicine”, Plenum Press (1981); 佐々木政子, 10章病氣も光で治る, 日本化学編, 一億人の化学15 “光が活躍する” 大日本図書 (1993).
- (5) 気象庁オゾン解析室報道資料 “オゾンホール, 今年も大規模に” 平成7年10月20日
- (6) 秋元肇, II オゾン層の大切な役割, 環境庁「オゾン層保護検討会」編, “オゾン層を守る” NHK ブックス (1984).
- (7) T. B. Fitzpatrick et al., (eds), “Sunlight and Man”, Univ. Tokyo Press, Tokyo (1974).
- (8) M. Sasaki et al., Ground-Based Observation of Biologically Active Solar Ultraviolet-B Irradiance at 35° N Latitude in Japan, J. Geomag. Geoelectr., 45, 473-485 (1993).
- (9) 竹下秀他, 太陽紫外 UVB 放射計の開発と諸特性の評価, 照明学会誌, 78, 537-544 (1994).
- (10) 竹下秀他, 太陽紫外 UV-B, UV-A および日射の変動解析, 東海大学紀要工学部, 33, 91-100 (1993).
- (11) M. Sasaki et al., An Increase in the Global Solar Ultraviolet-B Irradiance at 35° N in Japan since 1990, J. Geomag. Geoelectr., 46, 827-834 (1994).
- (12) 気象庁, オゾン層観測報告: 1994 (平成7年3月).
- (13) J. R. Herman et al., J. Geophys. Res., 96 (D4), 7531-7545 (1991); R. S. Stolarski et al., Geophys. Res. Lett., 18, 1015-1018 (1991).
- (14) R. Phillips, “Sources and Applications of Ultraviolet Radiation”, Academic Press INC. (1983).
- (15) J. A. Parrish et al., “UV-A” Plenum Press (1978).
- (16) 照明学会照明普及会, 照明教室 No. 67 光源 (1989).
- (17) S. D. Tlora and F. D' Agostin, Nature, 356, 569 (1992).
- (18) 佐々木政子, 照明学会研究会資料, MD-93-40, AR-93-13 (1993, 9).
- (19) 戸沢均, UV 測定機器の動向, 照明学会誌, 77, 124-127 (1993).
- (20) WMO, “Ultraviolet Radiation” Environmental Health Criteria 160 (1994).
- (21) A. F. Mckinlay, B. L. Diffey and B. Meul, CIETC-1.7 (1983).
- (22) 日本工業規格, 有害紫外放射の測定方法, Z-8812-1987 (1987).
- (23) M. J. Molina and F. S. Rowland, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone, Nature, 249, 810-812 (1974).
- (24) US Today, Wednesday, June 29, 1994.
- (25) W. R. Burrows et al., Canadian operational procedure for forecasting total ozone and UV radiation, Met. Appa, 1, 247-265 (1994).