

第 3 部 太陽紫外線の状況

1. 太陽紫外線の概要

1-1. 太陽紫外線の概要

紫外線は、波長によって UV-A (315~400nm)、UV-B (280~315nm)、UV-C (200~280nm) の 3 種類に分類される。一般的に、紫外線は波長が短いほど生物に対する有害作用が大きいが、UV-C は大気圏上部の酸素分子及び成層圏のオゾンによって完全に吸収されてしまうため、オゾン量が多少減少しても地表面には到達せず、生物に対して問題にはならない。また、UV-A の照射量はオゾン量の変化の影響をほとんど受けない。

UV-B については、最近の知見によれば、成層圏オゾンが 1%減少した場合、特定の太陽高度角 (23°) において、約 1.5%増加するという結果が得られている。UV-B は、核酸などの重要な生体物質に損傷をもたらし、光老化 (シミやしわ) や皮膚がんの増加、白内障の増加、免疫抑制など人の健康に影響を与えるほか、陸域、水圏生態系に悪影響を及ぼすことが懸念される (紫外線の変化による影響の詳細及び UNEP の環境影響評価パネルの 2010 年報告書要約については参考資料 1~5 (P136~152) 及び第 4 部巻末資料 3 (P197-204) を参照のこと)。

1-2. 紫外線の指標

紫外線の強度

地表に到達する紫外線の強度は、波長によって異なる。図 3-1-1 の上図に紫外線の大气外 (細線) 及び晴天時の地表 (太線) での波長別の強度を示す。UV-B は大気圏外での強度に比べて、地表では大きく減衰している。UV-B が短波長ほど大きく減衰しているのは、主に成層圏オゾンの吸収による。UV-A がわずかに減衰しているのは、主に大気分子による散乱の影響によるもので、波長が短いほど散乱の影響は大きい。

紅斑紫外線量

紫外線の人体への影響度は波長によって異なる。波長毎の人体への相対影響度については、国際照明委員会 (CIE) が定義した CIE 作用スペクトルが一般的に用いられている。CIE 作用スペクトルは、人の皮膚に紅斑 (赤い日焼け) を引き起こす作用曲線である。図 3-1-1 の中図に CIE 作用スペクトルの相対影響度を示す (CIE 作用スペクトルの定義式については次ページの「参考」を参照)。UV-B 領域内の波長 280~300nm では相対影響度が高く、同領域内の波長 300nm から UV-A 領域に入った 320nm にかけて急激に低くなり、320nm 以上の波長では相対影響度はほとんど 0 となる。波長別紫外線強度に CIE 作用スペクトルを乗じることにより、紅斑紫外線強度が算出できる (図 3-1-1 下図)。

この値を波長積分して得られるのが、紅斑紫外線量 (下図網掛け部分の面積) である。

紅斑紫外線量は、波長別紫外線強度について相対影響度を考慮せずに単純に積分したUV-B量と比較すると、人の健康への影響の強さをよりの確に反映した指標といえる。

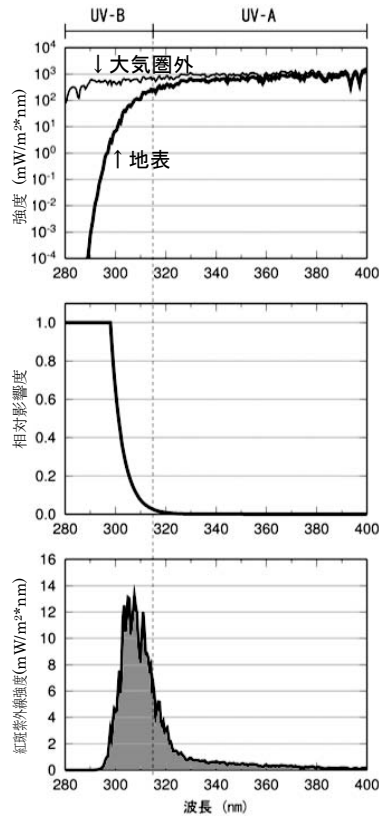


図 3-1-1 波長別紫外線強度と紅斑紫外線強度の関係

上図は波長別紫外線強度（細線：大気圏外、太線：地表）、中図はCIE作用スペクトルの相対影響度、下図は波長別紅斑紫外線強度。波長別紅斑紫外線強度を波長積分すると紅斑紫外線量（下図網掛け部分）が得られる。（出典）気象庁 オゾン層観測報告:2010

(参考) CIE作用スペクトルの定義式

CIE作用スペクトルの定義式は次のとおりである。

$$S_{er}(\lambda) = \begin{cases} 1.0 & (250\text{nm} < \lambda < 298\text{nm}) \\ 10^{0.094(298-\lambda)} & (298\text{nm} < \lambda < 328\text{nm}) \\ 10^{0.015(139-\lambda)} & (328\text{nm} < \lambda < 400\text{nm}) \end{cases}$$

S_{er} : CIE作用スペクトル

λ : 波長

UVインデックス

UVインデックスは、地上に到達する紫外線量のレベルをわかりやすく表す指標として、WHO（世界保健機関）がWMO（世界気象機関）、UNEP（国連環境計画）などと共同で開発したもので、一般の人々に紫外線対策の必要性を意識啓発することを狙っている。UVインデックスは、上述の紅斑紫外線量を日常生活で使いやすい簡単な数値とするために25mW/m²で割って指標化したものである。

(参考) 紫外線対策への UV インデックスの活用方法

2002年7月に、WHO、WMO、UNEPなどは共同で、「UVインデックスの運用ガイド」を刊行し、UVインデックスを活用した紫外線対策の実施を推奨している（WHO,2002）。我が国でも、2003年に環境省から、紫外線対策の普及を目的として、保健師などを対象に「紫外線環境保健マニュアル」が刊行されている（2008年改訂）。

UVインデックスは1から11+の値で表され、更に5つのカテゴリーに分けてカテゴリーごとの対処法が示されている（表3-1-1）。参考に、国内4地域の7月の時刻別UVインデックスを図3-1-2に示す。時刻別UVインデックスは月の最大値を示しており、晴天の場合を想定すればよい。札幌を除き、正午を挟む数時間はUVインデックスが8（非常に強い）を超えていることがわかる。なお、口絵Vには、日本付近の日最大UVインデックスの月別分布が掲載されているので、あわせて参考にされたい。

表 3-1-1 UV インデックスに応じた紫外線対策

UV インデックス	強度	対策
1～2	弱い	安心して戸外で過ごせる。
3～5	中程度	日中はできるだけ日陰を利用しよう。 できるだけ、長袖シャツ、日焼け止めクリーム、帽子を利用しよう。
6～7	強い	
8～10	非常に強い	日中の外出はできるだけ控えよう。
11+	極端に強い	必ず、長袖シャツ、日焼け止めクリーム、帽子を利用しよう。

(出典) 環境省「紫外線環境保健マニュアル」

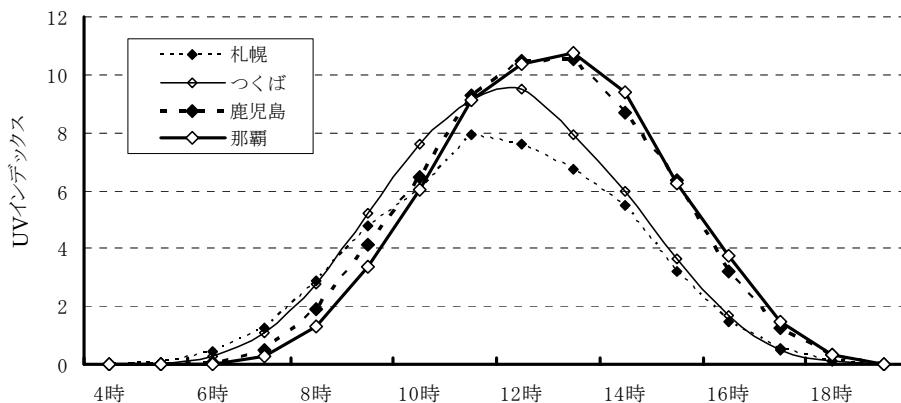


図 3-1-2 国内 4 地点における時刻別 UV インデックス (7月)

(出典) 気象庁 大気・海洋環境観測報告 (2000年観測成果) : 2002

気象庁では、地域別に紫外線予測を行い、UVインデックスとして公開している。また、国立環境研究所では、有害紫外線モニタリングネットワークの観測サイト (15箇所) の速報値をUVインデックスとして公開している。

(紫外線に関する情報については下記のホームページにて一般に公開されている)

環境省「紫外線環境保健マニュアル」 http://www.env.go.jp/chemi/uv/uv_manual.html

気象庁「紫外線情報分布図」(紫外線の予測分布図) <http://www.jma.go.jp/jp/uv/>

国立環境研究所「UVインデックス」 http://db.cger.nies.go.jp/gem/ozon/uv/uv_index/index.html

(参考) 紫外線による人体への悪影響と好影響

紫外線による人の健康への悪影響としては、急性的な影響（日焼け、免疫抑制、角膜炎など）と慢性的な影響（皮膚がん、白内障など）が指摘されている（詳細は参考資料1（P136～140）を参照のこと）。一方で、日光を浴びることで体内でビタミンDが合成される。図3-1-3には、①悪影響（浴びすぎ）の例として日焼け（紅斑作用）と紫外線の関係と、②不十分な場合の例としてビタミンD合成不足と紫外線の関係を1つの図に示した。

ビタミンDは、小腸内でのカルシウムとリンの吸収を促進する生理作用や、カルシウムとリンから骨を形成する作用（化骨）を有する。ビタミンDが極度に欠乏すると、発育期ではクル病や手足の骨の湾曲などに、成人では骨軟化症につながると考えられている。紫外線を浴びた皮膚では、活性型ビタミンD₃が生成されるので、適度に日光を浴びていればビタミンDが欠乏することはない。日本では夏の快晴日の正午頃であれば、わずか2～3分太陽光線を浴びれば、1日に必要なビタミンD₃が合成される計算である。図3-1-3の下段には、全身に紫外線を浴びた場合のビタミンD合成に必要な時間を示したが、極端に紫外線ばく露量が少ないとビタミンD合成が阻害される。

一方、図3-1-3の上段に示すように、紫外線を浴び過ぎると日焼け（紅斑）を引き起こすことが示されている。

皮膚への障害及びビタミンD合成に必要な時間は紫外線の強さ（図3-1-3のUVインデックス）に反比例する（ビタミンD合成に関しては紫外線を浴びる皮膚の面積も関係する）ほか、肌の色（スキンタイプ）に依存し、紫外線に対して感受性の高い人では悪影響のあるレベルに達する時間は短くなる。図に示した曲線は白人種についてのものであり、色の濃い皮膚では5倍以上長くなるとされている

（UNEP-EEAP, 2011）。

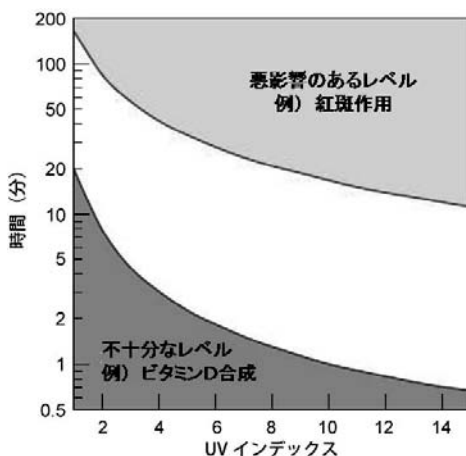


図 3-1-3 UV インデックスと紫外線による影響の例（白人種）

肌の色により皮膚への障害及びビタミンD合成に必要な時間は異なる。図に示した曲線は白人種（1MED（皮膚がうっすらと赤くなる最少紅斑量）=25mJcm⁻²）についてのものであり、日本人を対象とした研究ではないことに留意が必要である。なお、日本人の場合は、白人種に比べて一般に紫外線に対する感受性が低い。

（出典）Environmental Effects of Ozone Depletion and Its Interactions with Climate Change:2010 Assessment(UNEP-EEAP, 2011)

1-3. 紫外線量の変動要因

紫外線の量は、太陽の高度、オゾン全量、雲の状況、エアロゾルの量、地表面の反射率などの変化によって変動する。天気の変化は雲量の変化というかたちで紫外線量に影響を与える。海拔高度の高いところでは、大気層の厚さが薄くなることにより、紫外線量が増加する（+10～12%/1,000m）。また、大気汚染や霞といった現象は、地上における大気混濁度を地域的に増加させ、紫外線量を減少させる要因となる。

太陽高度とオゾン全量の変化による紫外線量の変化

太陽高度は紫外線量に特に大きく影響し、太陽高度が高いほど一般に紫外線量は増加する。そのため、オゾン量や雲など、他の条件が同じなら、紫外線量は1日の中では正午頃、1年の中では夏至前後に最大となり、また国内では緯度の低い地方ほど多い。

なお、太陽高度が同一だとすると、オゾン全量が増加するほど紫外線はオゾンによる吸収を強く受けて減少する。また、オゾン全量が同一のときには、太陽高度が低いほど、地表に到達する紫外線はオゾン層を斜めに通過するため、オゾンによる吸収の影響を受けて大きく減少する。

紫外線の季節変動

図 3-1-4 に、つくばで観測された全天日射量、UV インデックス及びオゾン全量の季節変動を示す。全天日射量が5月に最大となっているのは、太陽の高度が高く、晴天の日が多いためである。6月は、太陽の高度が1年のうちで最も高いものの、梅雨の影響があるため、全天日射量はやや小さくなっている。全天日射量は5月に最大になるものの、UV インデックスはオゾン全量の季節変動の影響を受け、全天日射量のピークよりも遅れて7～8月に最大になる。これは、中緯度のオゾン全量が春に最大になり、その後、秋に向かって徐々に減少していくためである。

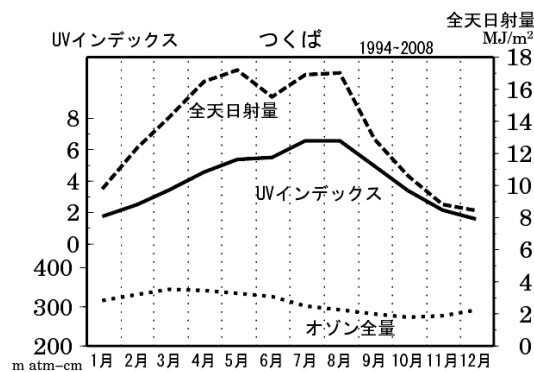


図 3-1-4 全天日射量と UV インデックスの季節変動

つくばで観測された日積算全天日射量（破線）及び日最大 UV インデックス（実線）の月平均値の季節変動。点線はオゾン全量の1年の変動を示す（統計期間：1994～2008年）。

（出典）気象庁 オゾン層観測報告:2010

(参考) 紫外線に対する太陽高度とオゾン全量の影響の同時評価

「太陽高度とオゾン全量の変化による紫外線量の変化」の項で述べたように、太陽高度が高いほど紫外線量は増加し、オゾン全量が増加するほど紫外線量は減少する。また、オゾンによる紫外線の吸収は太陽高度の影響を受ける。

そこで、太陽高度を air mass (日射が通過する大気層の厚さ。「大気路程」という) で表し、air mass にオゾン全量を乗じた「実効オゾン全量」を用いることにより、オゾン全量が紫外線量に与える影響を、太陽高度の影響を含めて一元的に評価がすることが可能となる。

図 3-1-5 に、つくば上空のオゾン全量 (TOMS 及び OMI データ) と正午 (つくば南中時) の air mass (air mass_min) 及び実効オゾン全量 (air mass×オゾン全量) を示した。オゾン全量が春季に高濃度を示した後、秋季にかけて減少し再び増加するのに対して、実効オゾン全量は太陽高度 (air mass) の影響を受けて、7月、8月に最低、12月に最高となる季節変化を示す。

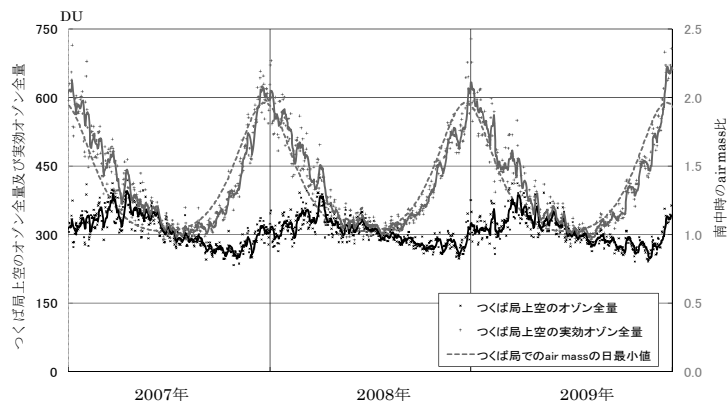


図 3-1-5 実効オゾン全量の特徴

黒の点は 2007~2009 年のつくば局上空のオゾン全量 (NASA 衛星データ)、黒太線はその 7 日間の移動平均を示す。破線はつくば局での air mass の日最小値を表す (右縦軸: 太陽が真上 (90°) にある時の大気路程を 1 とした時の相対比)。更に、オゾン全量に air mass を乗じたものが実効オゾン全量 (正確には日代表値) で、灰色の点で示されている。灰色の太線は実効オゾン全量の 7 日間移動平均値を表す。

(出典) 国立環境研究所提供データ

図 3-1-6 に、有害紫外線モニタリングネットワークの一環で国立環境研究所が実施する 4 観測局 (陸別 (北海道)、落石 (北海道)、つくば (茨城県)、波照間 (沖縄県)) における実効オゾン全量と紫外線 (UV-B) の変化を示した。この図からは、地区、季節を問わず、実効オゾン全量と UV-B 量がきれいな逆相関を示していることが分かる。紫外線の季節変動は、実効オゾン全量を用いることにより明瞭に説明が可能である。

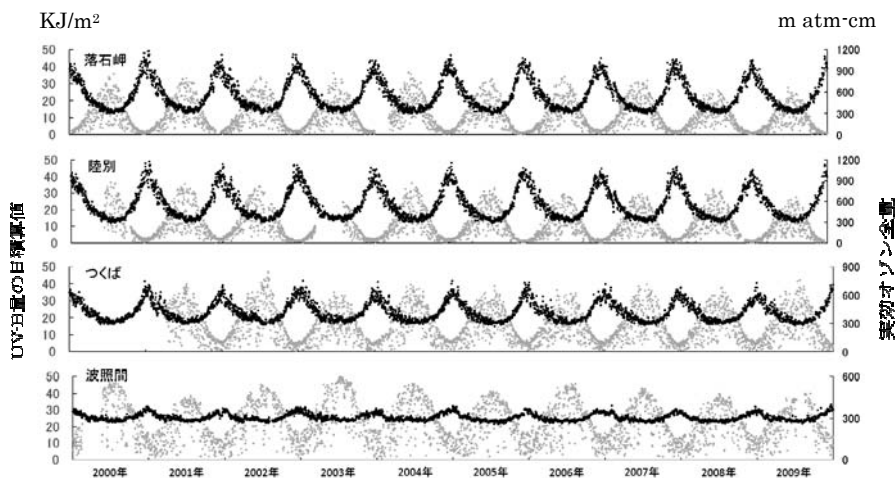


図 3-1-6 実効オゾン全量と UV-B 量の推移 (2000~2009 年)

灰色の点 (左縦軸) は UV-B 量の日積算値、黒点 (右縦軸) は実効オゾン全量である。オゾン全量は衛星データを使った。(出典) 国立環境研究所提供データ

雲による影響

雲は太陽光を遮るため、雲量や雲の状態、すなわち天気の変化は紫外線量を顕著に変動させる。図 3-1-7 に、快晴の日の UV インデックスを基準とした、天気ごとの UV インデックスの相対的な割合を示す。これによると、晴、薄曇、曇、雨と天気の変化するにつれ、快晴の場合に比べて UV インデックスは減少していく。雨が降っている場合には、快晴時の 2～4 割まで減少する。

なお、雲は基本的には太陽光を遮るが、条件によっては、散乱効果により紫外線の強度を増加させる場合もある。例えば、太陽に雲がかかっておらず、かつ太陽の近くに積雲が点在しているような場合には、散乱成分が多くなるので、快晴時に比べて 25% を超える紫外線の強度の増加が観測されることがある (Estupinan et al.,1996)。

なお、これまでに国内で観測された紅斑紫外線量の時別値が最大値となった事例 (表 3-1-2) をみてみると、全ての事例で全天の 80% 以上が雲に覆われている状況であった。

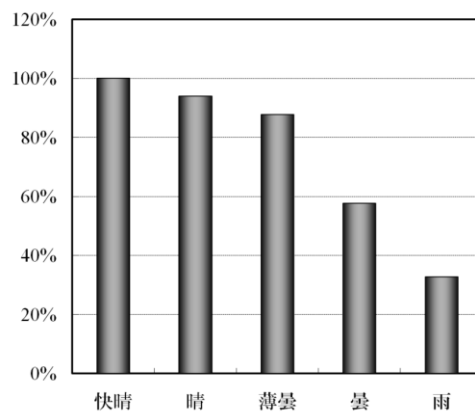


図 3-1-7 天気と UV インデックスの目安

快晴時に観測された UV インデックスを基準とし、天気毎の UV インデックスの相対的な比を示す。札幌、つくば、鹿児島、那覇の 1997～2003 年のデータを用いて算出した。なお、「快晴」は雲量 0～1、「晴れ」は雲量 2～8、「曇」「薄曇」は雲量 9～10 であって、降水現象がない状態を示す。このうち、「薄曇」は上層の雲が中・下層の雲より多い状態をいう。(出典) 気象庁 オゾン層観測報告:2010

表 3-1-2 これまでに観測された最大の紅斑紫外線量

項目	観測地点				
	札幌	つくば	鹿児島	那覇	南極昭和基地
時別値 (mW/m ²)	244	276	327	349	300
UV インデックス換算値	9.8	11.1	13.1	14.0	12.0
観測日時 (現地時間)	1997.7.27 12h	2009.8.1 11h	1996.6.28 13h	1996.8.5 13h	2006.11.23 12h
日積算値 (kJ/m ²)	5.22	5.90	7.09	6.60	8.66
観測日	1993.6.17	2011.7.17	1996.6.28	1999.6.16	2006.11.23
日積算値の月平均値 (kJ/m ²)	3.55	4.09	4.66	5.17	6.97
観測月	2007.7	2004.7	2004.8	2003.7	1999.12

※観測期間は、札幌及び那覇は 1991～2010 年、つくばは 1990～2010 年、鹿児島は 1991～2005 年 3 月、南極昭和基地は 1993～2010 年である。(出典) 気象庁提供データ

(参考) 雲量による紫外線量の割合の変化

「雲による影響」の項で、快晴、晴、薄曇、曇、雨と天気に変化するにつれ、UV インデックスが減少していくことが示された。図 3-1-8 には、雲量別 (0:快晴、5:晴れ、9:曇り) にオゾン全量と CIE 紫外線量/全天日射量 (比) の関係を示した。雲量が大きくなるにつれて CIE 紫外線量/全天日射量 (比) が大きくなることが示されている。これは、雲量が増えるに従い、全天日射量、UV-A 量、UV-B 量は減少する (UV インデックスが小さくなる:図 3-1-7) が、全天日射量に占める CIE 紫外線量の割合が高くなることを意味する。

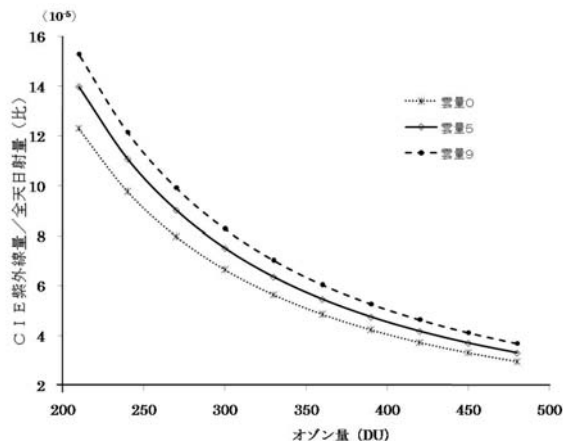


図 3-1-8 オゾン量と CIE 紫外線量 (比)

鹿児島で午後 3 時に観測されたオゾン量と CIE 紫外線量/全天日射量 (比) を示す。

(出典) 国立環境研究所提供データ

エアロゾルの影響

エアロゾルは大気中に浮遊する直径 0.1~1 μ m 程度の固体若しくは液体の微粒子のことで、大気汚染物質等を起源とする硫酸エアロゾル、海水が風で巻上がってできる海塩粒子、化石燃料等の燃焼によるすす、黄砂などがある。エアロゾルは紫外線を吸収・散乱するため、エアロゾル量が多いと地表に達する紫外線量は減少する。

図 3-1-9 に、つくば市で快晴時に観測された UV インデックスの日変化と、大気中にエアロゾルが存在しないと仮定して、放射伝達モデルを用いて計算した UV インデックスの日変化を示す。この日に観測された 9 時~15 時の UV インデックスは、エアロゾルがないとした場合に比べ、17~20%小さくなることがわかる。この日は普段より比較的エアロゾルが多い日だったが、顕著な黄砂の時などもっとエアロゾル量が多い場合には、UV インデックスは更に小さくなる。なお、エアロゾルが UV インデックスに及ぼす影響は、地域や季節によって異なる。更に、エアロゾル量は日々大きく変動し、また、エアロゾルの種類も様々であるため、エアロゾルが紫外線量に及ぼす影響の大きさは一定ではない。

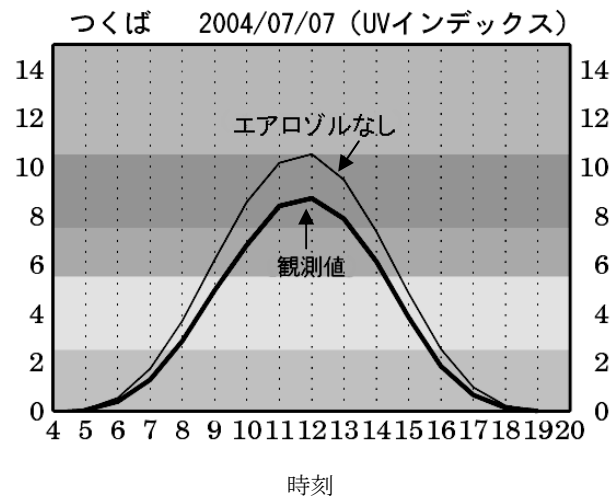


図 3-1-9 エアロゾルの有無による紫外線量の違い

つくば（高層気象台）で2004年7月7日に観測された毎時のUVインデックス（太線）と、同日のエアロゾルが全くないと仮定した場合のUVインデックスの推定値（細線）。

（出典）気象庁 オゾン層観測報告:2010

2. 太陽紫外線の観測の状況

2-1. 太陽紫外線の観測手法

太陽紫外線の観測手法

紫外線の測定方法には、物理測定法、化学測定法、生物測定法などがある。このうち、物理測定法は、実時間測定が可能であり利便性が高い測定法である。

物理量を測定する検出器には、オゾン全量観測にも用いられるブリューワ分光光度計等がある。ブリューワ分光光度計は、紫外線の波長毎の光度（スペクトル強度）を測定できるが、比較的高価である。この他、一定の波長域をまとめて測定する帯域型の紫外線検出器として、UV-B 領域、UV-A 領域の紫外線検出器や、日焼け効果の作用スペクトルや DNA の吸収スペクトルに近い波長感度特性を持つ生物効果量を測定する紫外照射計がある。

地上に到達する太陽光の中で波長 400nm 以下の紫外線はわずか数%であり、このうち UV-B 領域の紫外線は更に微量であるため、高精度の測定を長期にわたって維持するのは相当難しいとされる。

化学測定法、生物測定法は、それぞれ紫外線ばく露による化学反応、生物反応を利用したもので、代表的なものとして前者ではポリスルホン酸を使った紫外線検出器が、後者では宗像らが開発した枯草菌を使った紫外線検出器があげられる。これら 2 つの方法は、実時間測定ができないといった短所はあるものの、非常に小型で安価であり、個人ばく露量測定等にも利用されている。

また、間接的な方法として衛星による観測がある。衛星観測手法は、地上での測定が困難な場所も含め、紫外線量の地理的な違いを評価する上で有用である。

2-2. 紫外線観測状況

気象庁による観測

気象庁では、1990年1月からつくばにおいて、また、1991年1月から札幌、鹿児島（2005年3月で観測中止）、那覇において、ブリューワ分光光度計による波長別（290～325nm）紫外線観測を実施している。

また、オゾン減少の著しい南極域でも、昭和基地において 1991年2月から観測を実施している（1991～1994年1月は試験観測）。各地点の UV-B 日積算値を求め、太陽紫外線が天候（雲量）、オゾン全量、大気混濁度等によりどのような変化を受けているのか年次的解析がなされている。

国立環境研究所等による観測

国立環境研究所では、北海道陸別町において、北域成層圏総合モニタリングの一環としてブリューワ分光光度計による UV-B の地上観測を実施している(1999年7月～)。また、国立環境研究所地球環境研究センター(CGER)が中心となって、全国の大学や研究機関等と連携し、帯域型紫外照射計(UV-A及びUV-Bのそれぞれの帯域で測定)で連続観測を行う「有害紫外線モニタリングネットワーク」が構築され、現在、19機関23サイトが参加している。2004年3月から、UVインデックス(速報値)をインターネットで公開しており、現在全国15箇所のデータを公開している。

国際的な観測網

有害紫外線観測網の確立のため、WMOは全球大気監視計画(GAW:Global Atmospheric Watch)に基づく地球規模の紫外日射観測網の運用を支援し、観測精度の維持・向上及び観測資料の有効利用等を図ることを目的に、1989年に紫外線に関する科学諮問部会(SAG:Scientific Advisory Group)を設置し、世界オゾン・紫外線資料センター(WOUDC)において紫外線データの収集と提供を行っている。

3. 太陽紫外線の監視結果

3-1. 世界の太陽紫外線の状況

(a) 紫外線量の経年変化

いくつかの大気の清浄な地域での観測によると、紫外線量は 1990 年代後半以降、オゾンの増加に呼応して減少している。しかし、北半球中緯度のいくつかの観測点では、地表に到達する紫外線は増加している。これらの増加はオゾンの減少だけでは説明できず、1990 年代初めからのエアロゾルの光学的厚さ及び大気汚染の減少に起因しているほか、雲の減少の影響も一部考えられる。長期変動解析に利用可能な地上観測データは少ないため、紫外線の変化の地球規模の傾向とその原因を現時点で確定することは困難である。

図 3-3-1 に世界各地の 11 観測点における月平均紅斑紫外線量（正午 1 時間）の経年変化を示した。1990 年代始めから 2000 年代半ばまでにかけての直線回帰で、南半球及び北極の観測局で紫外線の減少傾向が示されたが、オゾン減少の緩和後（1998 年以降）に限ってみると、これらの地域ではオゾンの増加に対応した紫外線の減少はより顕著である。一方、北半球中緯度では紫外線は増加している。しかしながら、紫外線の変化には観測上の不確実性が含まれており、特に観測開始当初の不確実性は大きい。

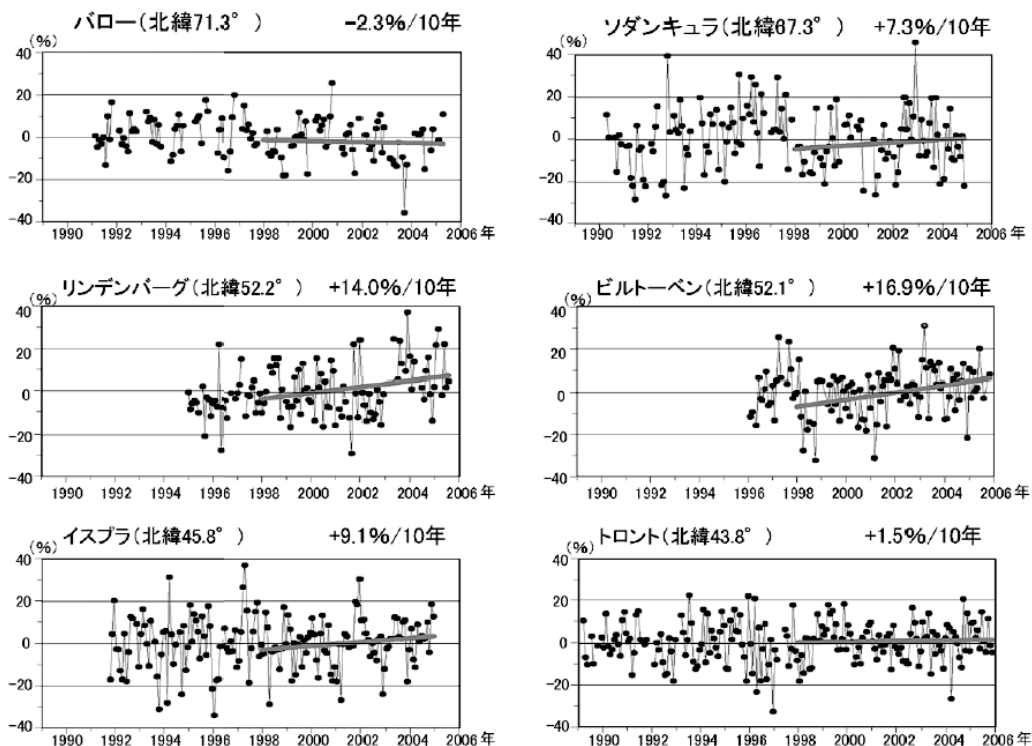


図 3-3-1 月平均紅斑紫外線量の長期変化

世界各地の 11 観測点における月平均紅斑紫外線量（正午 1 時間）の経年変化。直線は傾向を示す。

（出典） Scientific Assessment of Ozone Depletion:2006 (WMO, 2007)

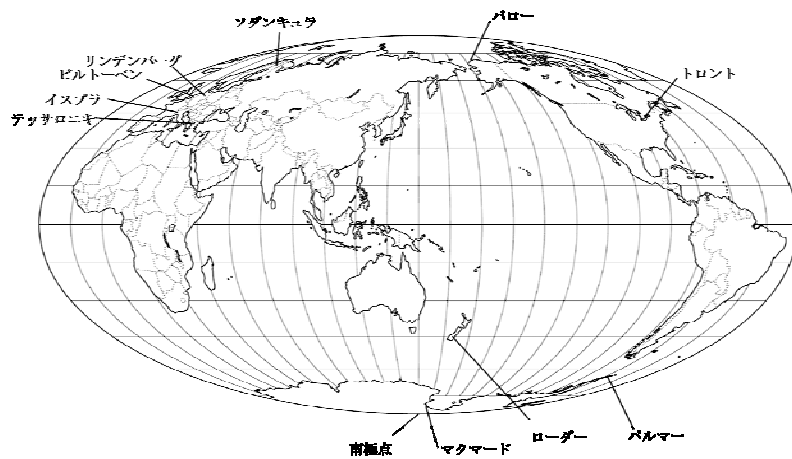
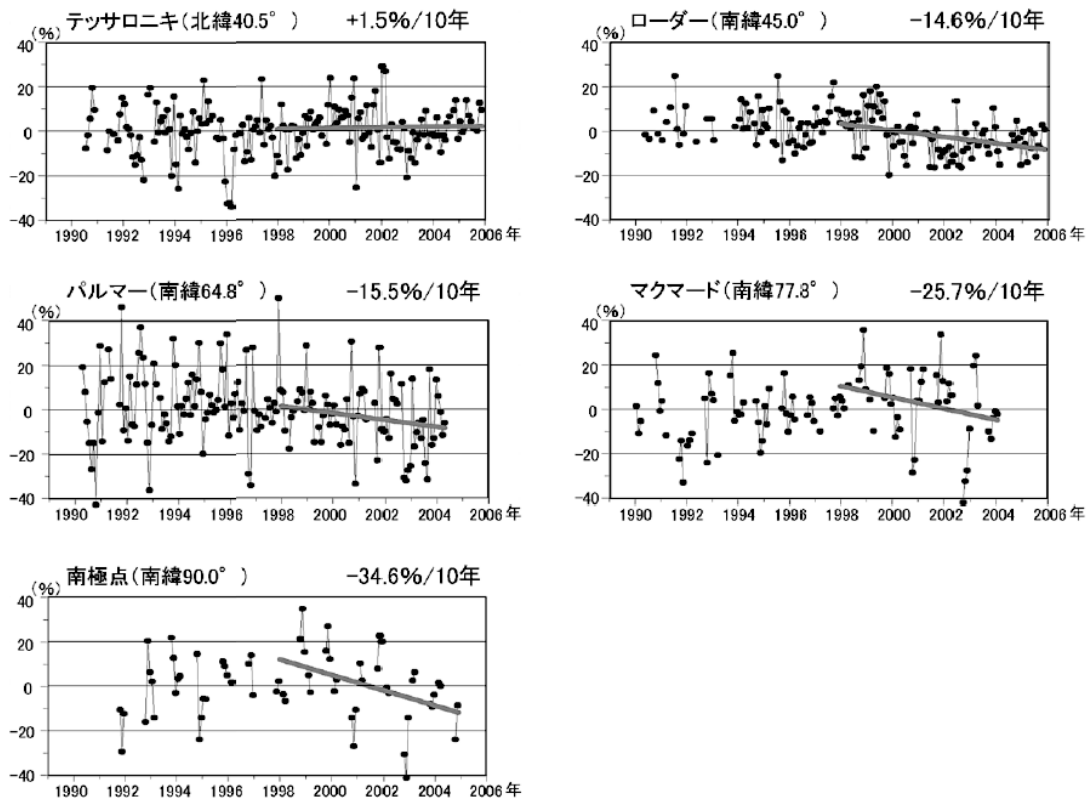


図 3-3-1 月平均紅斑紫外線量の長期変化 (続き)

世界各地の 11 観測点における月平均紅斑紫外線量 (正午 1 時間) の経年変化。直線は傾向を示す。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion:2006 (WMO, 2007)

図 3-3-2 にテッサロニキ（ギリシャ）の観測結果を示したが、観測開始（1990 年）から紫外線量は一貫して増加している。また、2000 年以降、オゾン減少の緩和又はわずかな増加に対応して紫外線の増加が小さくなる、又はほぼ一定になるといった傾向がみられる。しかしながら、オゾンによる吸収を受けない波長（324nm）の紫外線の増加については、大気透過度の増加以外では説明できない。事実、テッサロニキでは、エアロゾルの光学的厚さや SO₂ 量が 1997 年以降減少しているといった報告や、大気（透）明度が 1980 年代後半以降改善されているといった報告がある。同様に、オゾンの減少によっては説明できない紫外線の増加が、ホーエンパイセンバーク（ドイツ）でも観察されている。

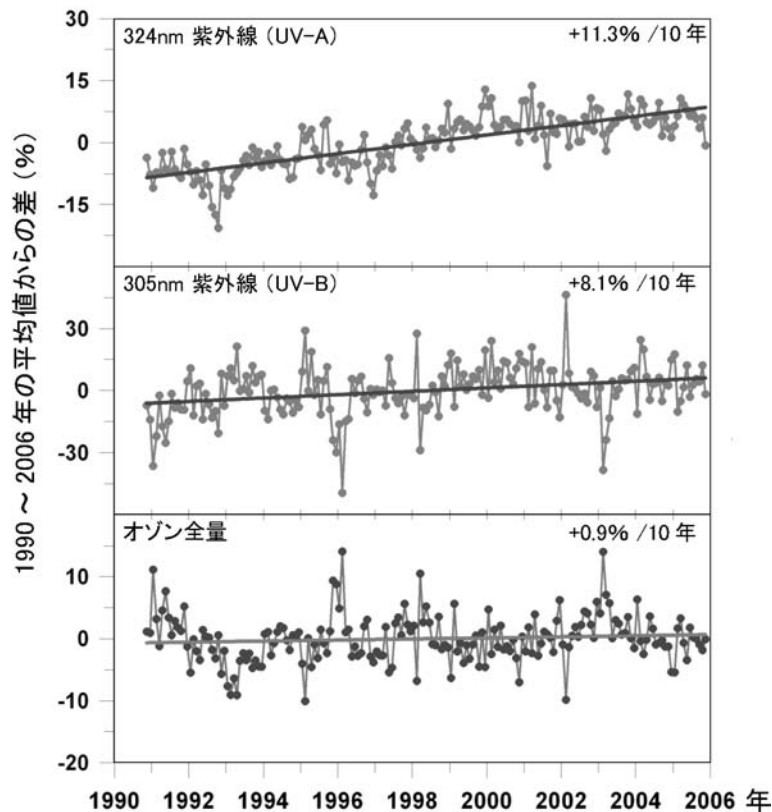


図 3-3-2 テッサロニキ（ギリシャ）におけるオゾン及び紫外線量の経年変化
晴天時で太陽天頂角が 63° の条件による。直線は傾向を示す。
(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion:2006 (WMO, 2007)

一方、前々回報告（UNEP-EEAP,2003）でオゾン全量の減少に対応した紫外線の増加が示された南半球の測定点（ローダー（ニュージーランド））についてみると、1999 年から 2006 年にかけてオゾン全量の増加に呼応して UV インデックスの減少が見られる（図 3-3-3）。しかしながら、その減少幅は、同地域でのオゾン全量の増加をもとに見積もった UV インデックスの減少量を上回るもので、大気中のエアロゾルによる紫外線量の減衰が増加した可能性がある。

その他、帯域型紫外線計による観測で、1990～2000 年における UV-B の増加（平塚）、1970 年代後半から 1990 年代後半にかけての紫外線の増加（モスクワ（ロシア））、1983～2003 年にかけての紅斑紫外線量の増加（ノーショーピング（スウェーデン））などが報告されている。これら紫外線量の増加は、オゾン全量の減少、雲の光学的厚さの減少、エアロゾルの減少等に起因する大気透過度の増加によるものである。

一方、衛星観測による地球規模の紫外線トレンド評価に関しては、1999 年の WMO の報告以降、技術的な問題から新しい報告は行われておらず、今後の課題となっている。

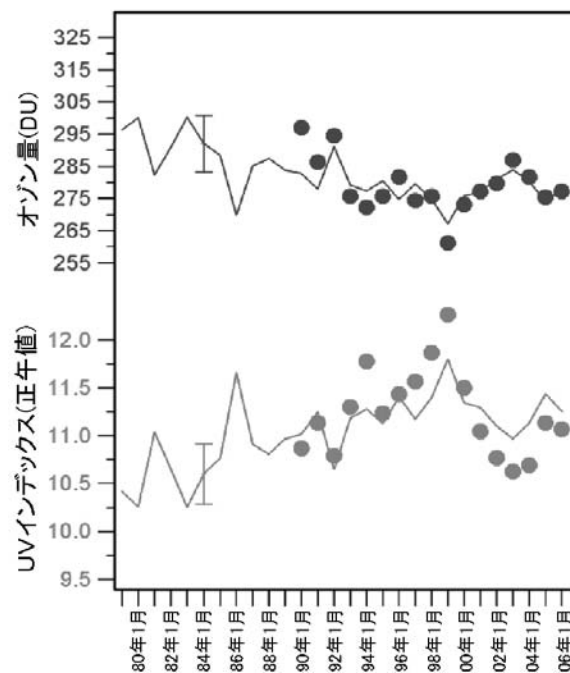


図 3-3-3 ローダー（ニュージーランド）における夏季のオゾン量と UV インデックスの長期変化

シンボルは 12 月、1 月、2 月の紫外分光光度計による測定結果に基づく、平均オゾン量（黒）と正午の最大 UV インデックス（最大 5 日間の平均）（灰色）を示す。実線は、衛星観測によるオゾン量に基づく夏季の平均オゾン量とオゾン量から求められた UV インデックスを示す。

（出典）Scientific Assessment of Ozone Depletion:2006 (WMO, 2007)

(b) 過去の紫外線データの再構築（モデルによる再現実験）

紫外線による生物又は健康への影響が長期間のばく露に関係することから、過去の紫外線量の変化を知ることは重要である。しかしながら、信頼できる紫外線観測データは 1980 年代後半以降に限られる。そのため、過去の紫外線トレンドを再現する様々な方法が提案されてきた。観測されたデータの地球物理学的パラメータ（オゾン全量、全天日射量、冠雪等）による統計的推測の他、放射伝達モデルに雲などの影響を組み合わせたハイブリッド法をはじめ様々なモデルによる解析が行われている

図 3-3-4 に最も長期間のモデル計算例（スイス）を示す。1926 年から 2003 年までの間、明瞭な経年変動とともに、1940 年代半ば、1960 年代前半及び 1990 年代にそれぞれ高い紫外線量が示されている。モデルによると、1980 年代以前の紫外線の変動は雲量の変動に伴う日射時間の変動によることが、一方、1990 年代の増加はオゾン全量の変動によることが示されている。このほかにも、各地でモデルによる再現実験が多数行われている。再現実験から得られた紫外線量の変動は、1990 年代及び 2000 年代の観測結果の変動と比較的一致している。

紫外線量の短期的な変動については、それぞれの地域による地球物理学的な要因による攪乱を受けるが、全体としては地球規模の変動、例えばヨーロッパにおける 1970 年代半ばの大気プロセスの変化及び北半球中緯度地域における 1990 年代のオゾン減少の影響が確認されている。紫外線量は、最近 20 年間の増加傾向及びそれ以前の周期的な変化で特徴付けられる。過去の変動の多くは雲量によって、また一部エアロゾルによって説明される。オゾン変動は、1980 年代及び 90 年代に限って、紫外線量の増加に寄与している。

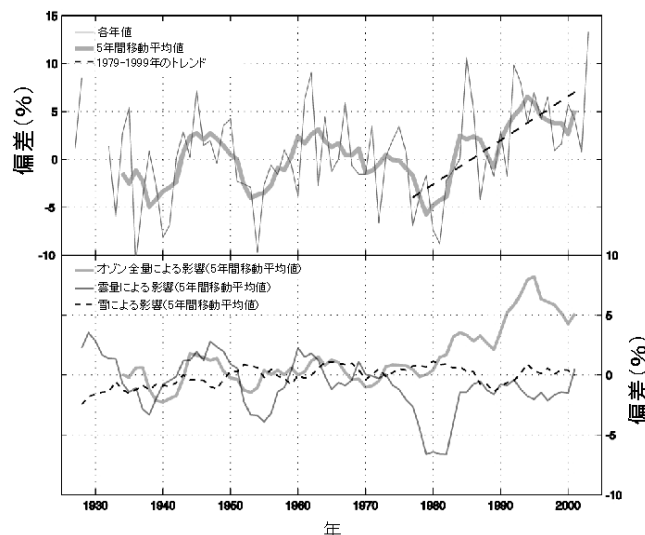


図 3-3-4 1940～1969 年の平均値紫外線量からの偏差（スイス）

上の図は 1940 年～1969 年の平均値紫外線量からの偏差を示し、下の図は紫外線量の変化に影響を与える割合が示されている。（出典）Scientific Assessment of Ozone Depletion:2006 (WMO, 2007)

3-2. 南極域の太陽紫外線の状況

(a) 南極域紫外線の経年変化

図 3-3-5 に南極昭和基地で紅斑紫外線量が多い時期である 11～1 月の 3 か月平均紅斑紫外線量日積算値の 1993 年から 2011 年までの推移を示す。この時期の紅斑紫外線量日積算値は、オゾンホール規模や消滅時期に大きく左右されているため、大きく変動しているが、長期変化として、統計的に有意な増減はみられない。

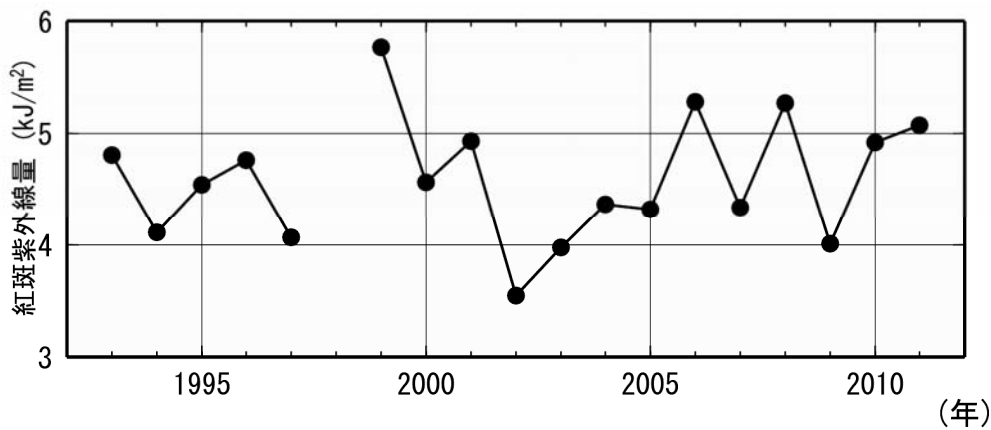


図 3-3-5 1993 年から 2010 年までの南極昭和基地における 11～1 月平均紅斑紫外線量日積算値の経年変化

(出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ (2011 年)

(b) 2011 年の南極域における紫外線の状況

南極昭和基地における紅斑紫外線量日積算値の 2011 年の月平均値は、オゾンホールの消滅期にあたる 12 月が統計開始 (1993 年 1 月) 以来 2 番目に高い月となり、それ以外の月は 1994 年から 2008 年までの平均値並みかそれより高かった (詳細は図 3-3-8 (P134) を参照のこと)。

8 月から 12 月にかけての昭和基地における紅斑紫外線量日積算値の推移を、全天日射量日積算値及びオゾン全量の推移とともに図 3-3-6 に示す。

2011 年 10 月のオゾン全量は、1994～2008 年の平均値を超える時期が多く、その時期に対応して紅斑紫外線量日積算値は累年平均値 (1994 年から 2008 年までの平均値) より低かった。11～12 月半ばまで、オゾン全量は累年平均値より少ない時期が多く、その時期に対応して紅斑紫外線量日積算値は累年平均値より高かった。

全天日射量日積算値の累年平均値 (1994 年から 2004 年までの平均値) は、極夜の明けた後の 8 月から 12 月にかけて増加し、12 月に最大となっている。これは、南中時の太陽高度が高くなり、日照時間が長くなるためである。基本的には、紅斑紫外線量日積算値の累年平均値も全天日射量の季節変化に対応して増加傾向を示すが、全天日射量が最大になるより半月ほど前の 11 月初旬から中旬にピークが見られる。この時期は、オゾンホール

の消滅時期（詳細は図 1-3-7（P20）を参照のこと）前であり、オゾン全量が少ないためである。

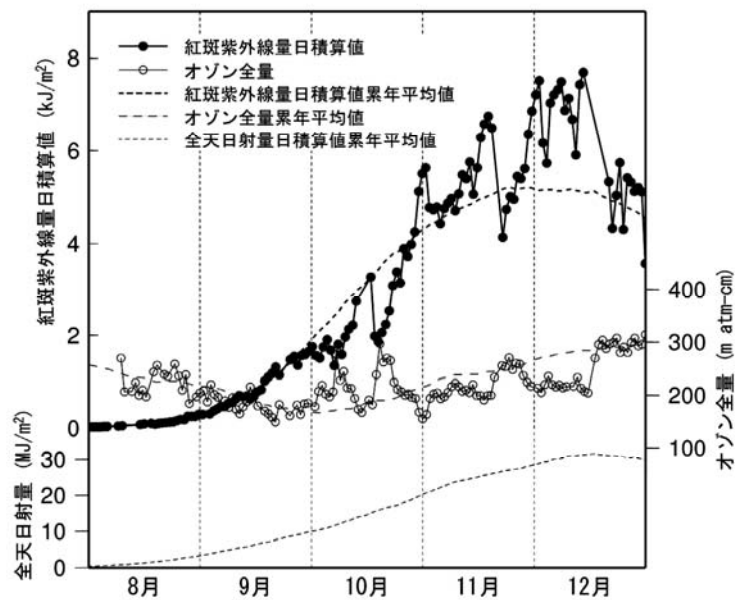


図 3-3-6 南極昭和基地における紅斑紫外線量日積算値、オゾン全量、全天日射量日積算値の推移（2011年8～12月）

太実線は紅斑紫外線量(CIE)日積算値、細実線はオゾン全量、太破線は紅斑紫外線量日積算値累年平均値の15日移動平均、細破線はオゾン全量累年平均値の15日移動平均、点線は全天日射量日積算値累年平均値である。ここでの累年平均値は、紅斑紫外線量日積算値、オゾン全量、全天日射量日積算値ともに1994年から2008年までの平均値である。（出典）気象庁提供データ

3-3. 我が国の太陽紫外線の状況

(a) 国内紫外線量の経年変化

観測結果に基づく紫外線量の傾向

国内で気象庁が観測を行っている 1990 年以降の紫外線量の長期変化をみるために、図 3-3-7 に紅斑紫外線（CIE）量年積算値の経年変化を示す。地表に到達する紫外線量は、札幌、つくば及び那覇 3 地点とも 1990 年代初めから増加しているように見える。ただし、統計学的に見ると、この増加傾向が有意なのは札幌とつくばで、10 年あたり増加率は約 4% である。なお、那覇では、1990 年代に増加した後、2000 年代以降は変化傾向がみられなくなった。

地表に到達する紫外線量は上空のオゾン量、エアロゾル量、雲の状況などによって変化する。1990 年以降のオゾン量は、1990 年代初めに最も少なく、その後はほとんど変化がないか、緩やかに増加している（詳細は図 1-3-16（P29）を参照のこと）。このため、1990 年以降、国内 3 地点の紫外線観測にみられる紫外線量の増加傾向をそのまま上空のオゾン全量の変化に関連づけることはできない。なお、紫外線量の長期的な増加傾向には、天候とエアロゾルの両者が寄与している可能性があるが、紫外線量の増加に対してそれぞれの程度寄与があるのか定量的には明らかではない。

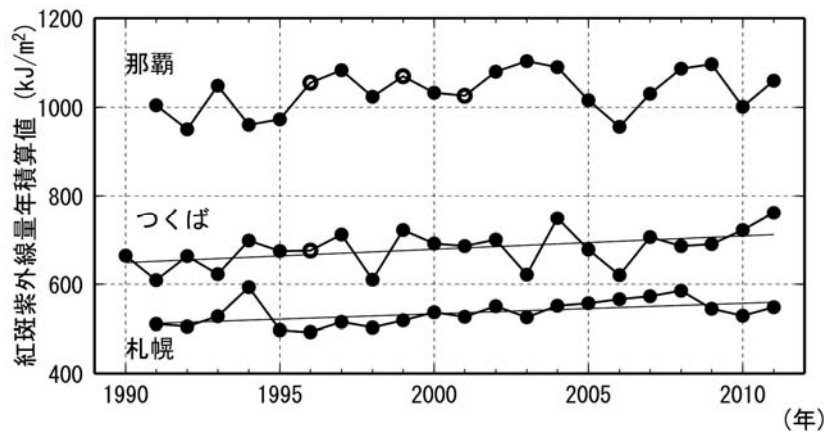


図 3-3-7 紅斑紫外線量年積算値の経年変化

札幌、つくば、那覇における紅斑紫外線量年積算値の観測開始から 2011 年までの経年変化。年積算値は欠測を考慮し、紅斑紫外線量日積算値の月平均値に各月の日数をかけた値を 12 か月積算して算出している。●印は紅斑紫外線量の年積算値を示すが、○印となっている年は、年積算の計算に用いる月平均値の中に 1 か月の日別観測数が 20 日未満の月が含まれることを示す。統計的に有意（信頼度水準 95%）に増加している札幌とつくばについて全期間の長期的な傾向を直線で示した。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2011 年）より

(b) 2011 年の国内の紫外線の状況

気象庁で観測している紅斑紫外線量日積算値の 2011 年における月平均値を図 3-3-8 に示す。2011 年の状況について、1994～2008 年の平均値からの差が平均値算出期間の標準偏差以内のときを「並」、それより大きいときを「高い」、それより小さいときを「低い」と表すと、札幌では「並」の月が多かったが、1～2 月及び 12 月はいずれもその月として観測開始（1991 年 1 月）以来最高となった。つくばでは年を通じて「高い」月が多く、1 月、3 月及び 9～10 月はその月として観測開始（1990 年 1 月）以来最高となった。また、4～9 月には、5 月を除いて、いずれもその月として観測開始以来第 5 位以内となり、年平均値は観測開始以来最高となった。那覇では 1 月と 12 月は、いずれもその月として観測開始（1991 年 1 月）以来最低となった。一方、6～8 月はいずれも高く、6 月はその月として観測開始以来最高となった。これらの特徴は、主に各地点の天候（雲量や日照時間など）を反映したものであるが、つくばについては 4～9 月にかけてオゾン全量が低めに推移したことも影響していると考えられる。なお、参考までに南極昭和基地の紅斑紫外線量の日積算値を示したが、南極の夏季には那覇よりも日積算値が高いことがわかる。

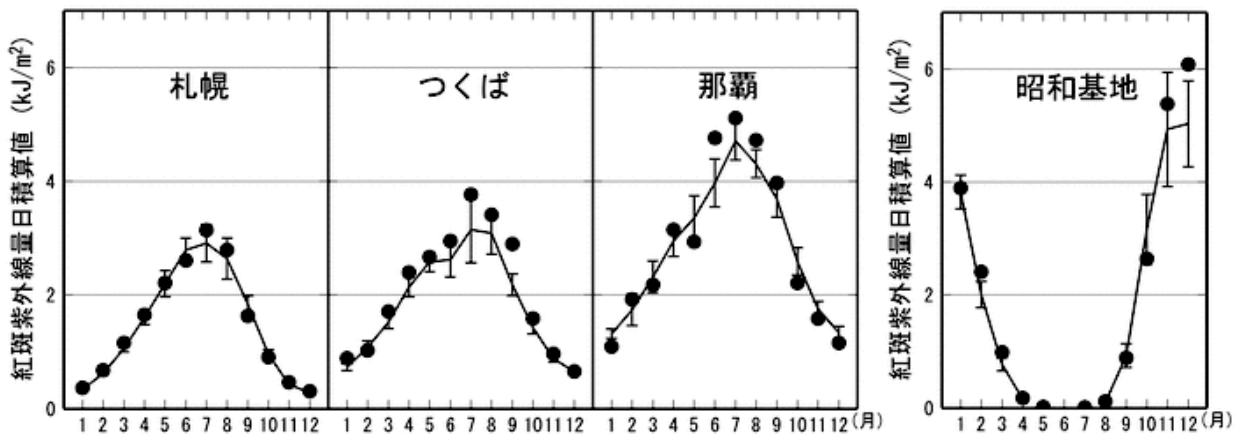


図 3-3-8 2011 年における紅斑紫外線量日積算値の月平均値

左側：国内 3 地点（札幌、つくば、那覇）における紅斑紫外線量日積算値の月平均値の推移。

右側：南極昭和基地における紅斑紫外線量日積算値の月平均値の推移。

●印は 2011 年の月平均値。実線は、1994～2008 年の累年平均値であり、縦線はその標準偏差である。

ただし、南極昭和基地では極夜前後（5～7 月）は累年平均値を算出してない。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2011 年）

4. 太陽紫外線の将来予測

紫外線量の予測

UNEP の環境影響評価パネル（EEAP）の 2010 年報告書では、1980 年を基準とした緯度帯ごとの紅斑紫外線量の予測結果を示している（図 3-4-1）。これは、晴天時の正午における紅斑紫外線量年平均値の緯度帯ごとの平均の予測であり、これによると、北半球中高緯度では 2020 年代までに 1980 年のレベルに戻ると予測されている。その後遅れて、南半球で紫外線量が 1980 年レベルに戻ると見込まれるが、南半球高緯度では 1980 年レベルに戻るのが更に遅れる予測となっている。1980 年レベルへ戻った後は、低緯度域を除き、紅斑紫外線量は減少する傾向が予測されている。

なお、紅斑紫外線量が 1980 年レベルへ戻る時期にはモデルによって評価が異なること、雲量、エアロゾル及び気候変化等の効果は考慮されていないことに注意が必要である。

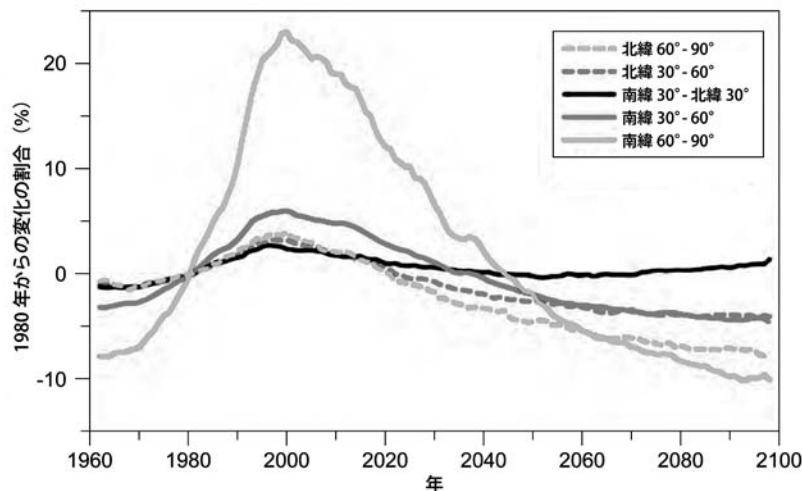


図 3-4-1 紅斑紫外線量の予測

1960～2100 年までの紅斑紫外線量を緯度帯（北緯 60°～90°、北緯 30°～60°、南緯 30°～北緯 30°、南緯 30°～60° 及び南緯 60°～90°）ごとに平均し、5 年移動平均で示したものを。紅斑紫外線量は晴天時の正午の値を年平均したものを利用。1980 年の値を基準とし、変化の割合（%）を示している。

（出典）Environmental Effects of Ozone Depletion and Its Interactions with Climate Change: 2010 Assessment(UNEP-EEAP, 2011)