オゾン層破壊が植物に及ぼす影響

竹内 裕一*・林田 佐智子**

1. はじめに

近年、フロンガスによりオゾン層が破壊された場合に予想される紫外線の増加が、生体や生態系にどのような影響をもたらすか関心を集めている。本章では、オゾン量の減少に伴う紫外線量の増加並びに紫外線の増加が植物に及ぼす影響について、我々が現在行っている研究を中心に紹介する。

2. 成層圏オゾン層と紫外線

2.1 オゾン層の破壊に伴う紫外線の増加

太陽からの放射は、大気中の物質により散乱や吸収を受け地上へ到達している。その中で光化学作用が強い紫外線は、紫外部に吸収を持つ成層圏中のオゾンにより吸収され、290 nm以下の波長の光は地上に到達しない。大気中に放出されたフロンガス（クロロフル

オロカーボン）は化学的に安定なため、対流圏ではほとんど分解・除去されることがなく、その大部分は成層圏に到達する。成層圏に達したクロロフルオロカーボンは、強い紫外線により光分解されて塩素を放出する。放出された塩素はオゾンと反応して、オゾンを消失させる反応を引き起こし、その結果、成層圏オゾンの生成・消失の平衡は移動し、オゾン量が減少すると考えられる。図-1は、オゾン量が現在のレベルの時（0.34 atom-cm）、10%、25%、50%減少した時に予想される北緯36度の地点（東京近傍）における夏至の日の南中時の紫外線量を表したものである。計算では O_2 と O_3 のみの紫外線吸収を考慮し、 O_2 と O_3 の分布及び紫外線吸収断面積は、U. S. Standard Atmosphere¹⁾及びWMO²⁾のデータをもとにした。また、レーリー散乱による消散のみを考慮し、多重散乱やエアロゾルによるミー散乱は考慮していない。紫外線はその波長により長波長側から、UV-A（320～400 nm）、UV-B（290～320 nm）、UV-C（290 nm以下）の3つに区別されるが、この中でオゾン量の減少により、UV-Bの地表面への到達量が増加すると考えられる。

2.2 UV-B照射と照射量の評価

UV-Bを植物などに実験的に照射するには、sun-lamp（日焼け用健康線灯）と適当なフィルターを組合せて用いる。我々は、UV-Bの光源としてToshiba FL 20 SEを用いているが、このランプは310 nmをピークに270～400 nmの紫外線を放出する。フィルターとしては、さまざまなものが用いられているが³⁾、我々はUV-B照射区（+ UV, 290 nm以上の紫外線を透過するもの）用として、小林ケミカル社製のカットニングシート（000 C）を、対照区（- UV, 320 nm以上の紫外線を透過するもの）用として、協和ガス化学工業製のアクリル板（パラグラス）を用いて良好な結果を得ている。ただし、これらのフィルターは、UV-B照射により透過率が徐々に変化するため、順次更新

図-1 北緯36度の地点における夏至の日の南中時の紫外線放射量

図中のA, B, C, Dの実線は、オゾン量が現在のレベルの時、10%、25%、50%減少した時に予想される紫外線量を表す。

* 国立公害研究所生物環境部主任研究員 Yuichi TAKEUCHI
 ** 大気環境部研究員 Sachiko HAYASHIDA

する必要がある。これらのフィルターをランプの直下に取り付け、290～320nmの紫外線を含む実験区（+UV）と含まない対照区（-UV）の2つの光条件を設定した。それぞれの光条件下での1nmごとの光エネルギーの分布をスペクトラジオメーター（OSMO-504 B, オプティカルサイエンス社）で測定した結果を図-2に示す。

しかし、このように実験的に設定した光条件と野外での太陽からのUV-B照射は、波長別エネルギー分布が異

図-2 UV-B照射区（+UV, 実線）及び対照区（-UV, 点線）の紫外線強度

図-3 UV-B放射量の季節変動

1日当たりのUV-B放射量を生物学的影響量で表した。図中のA, B, C, Dの実線は、オゾン量が現在のレベルの時、15%, 25%, 50%減少した時に予想される紫外線量を、点線は本実験におけるUV-B照射量を表す。

なるため両者を直接比較することはできない。そこでしばしば、UV-B量を生物学的影響量（UV-B_{BE}）⁴⁾ないしは、DNAに対する影響量（UV-B_{DNA}）⁵⁾で表し、両者を比較することが行われる。図-3は、北緯36度の地点における生物学的影響量で表した1日当たりのUV-B放射量の季節変動を示したものである。図中のB, C, Dの実線は、オゾン量がそれぞれ15, 25, 50%現在のレベルより減少した時の値で、オゾン量が1%減少すると、UV-B放射量は約2%増加する。また、点線は、我々の実験条件下でのUV-B照射量を示したものである。図-3に示した計算では、太陽天頂角と日照時間の季節変化のみを考慮しており、オゾン量や雲量の季節変化を考慮していないので、現実とは多少異なる点がある。しかし、おおむね我々の実験条件のUV-B照射量は現在のレベルのオゾン量を仮定した時のUV-B放射量に匹敵することがわかる。

3. UV-Bの植物に及ぼす影響

3.1 植物の生長に及ぼす影響

今日まで200以上の種や品種の植物を用いて、UV-B放射量の増加が植物にもたらす影響について検討されている。その結果、UV-Bに対する感受性は植物の種や品種によって大きく異なること、またUV-Bが植物に引き起こす反応もさまざまであることが明らかになった⁶⁾。

我々は、UV-Bに対し比較的感受性が高いキュウリを材料として用い、子葉の生長に対するUV-B照射の影響を検討した。播種後5日目のキュウリの芽生えを人工光型グロースキャビネットに移し、上記のUV-B条件下（-UV及び+UV）で生育させた。その結果を表-1に示す。UV-B照射により、子葉1枚当たりの葉面積・生重量・乾燥重量の値は低下し、逆に葉面積当たりの生重量は有意に増加した。このことは、UV-B照射により、子葉は小さくなり、厚さは増す傾向にあることを示している。

表 1 キュウリの子葉の生長に及ぼすUV-B照射の影響

	面積 (cm ² /子葉)	生産量 (mg/子葉) (mg/cm ²)	乾燥重量 (mg/子葉)
照射開始時	3.19 ± 0.27	101 ± 10 31.8 ± 1.8	10.1 ± 1.0
-UV (照射8日目)	15.48 ± 1.69	598 ± 75 38.6 ± 1.7	60.6 ± 8.8
+UV (照射8日目)	10.72 ± 1.1]**	472 ± 57** 44.0 ± 2.5**	47.9 ± 5.8*

値は10ないし20試料の平均値±標準偏差。
*はP < 0.01, **はP < 0.001で対照区に対して有意差があることを示す。

3.2 生体内物質に及ぼす影響

UV-B照射による生長阻害がどのような機構によるかを知るためには、UV-B照射が植物の生理活性にどのような影響を及ぼすかを検討することが必要である。その手始めとして、キュウリ子葉中の種々の物質の含有量がUV-B照射によりどのように変化するかを検討した。その結果を要約したものを図-4に示す。8日間の実験期間中に、それぞれの物質の量は2~10倍に増加し、UV-B照射により増加が抑制された。増加の抑制の割合は物質によりさまざまであり、RNA・DNA・クロロフィルでは割合は小さく、-UVと+UVの間に有意の差は見られなかった。タンパク質の量は約15%低下した。これらの物質に比べ糖や有機酸の含有量に対するUV-B照射の影響は大きく、含有量がそれぞれ約55%、40%低下した。この結果から、植物の生理活性の違いによりUV-Bに対する感受性が異なること、また糖や有機酸などの一次代謝産物の量がUV-B照射により大きく低下したことから、植物の光合成系が影響を受けやすいことが考えられる。このことを確かめるため、-UVと+UVの子葉の光合成速度を酸素電極を用いて測定した。クロロフィル量当たりの光合成

速度は、+UVでは実験開始4日目以降-UVに対し減少する傾向にあり、6日目には-UVに対して有意差が認められた。このことより、UV-B照射による生長阻害の少なくとも一部は光合成系の阻害によることが考えられる。

UV-B照射下で生育させたキュウリの子葉(+UV)では、表面にワックス状の物質が形成され、光沢が見られるようになった。同様の結果が他の植物種でも報告されており⁷⁾、植物に共通なUV-Bの作用点を知る上で興味深い。また、UV-B照射により、フラボノイドなどの紫外線吸収物質が葉内に形成されることが多くの植物で観察されており⁸⁾、UV-Bに対する適応ないしは防御機構の一つと考えられている⁹⁾。

3.3 他の環境要因に対する感受性に及ぼす影響

植物は野外においては、UV-B以外にも他の環境ストレスに常にさらされながら生育している。オゾン層の破壊に伴うUV-B照射量の増加が、農作物を含めた植物生態系に与える影響について正しい評価をするためには、UV-Bと他の環境要因の変動が、植物に与える複合影響を検討することが重要である。

植物に乾燥による水ストレスを与えると、UV-Bに対する植物の感受性が低下すること、また逆に、UV-B照射により乾燥に対する抵抗性が低下することが報告されている¹⁰⁾。また、我々はキュウリを用いて生育時の温度条件とUV-B照射に対する感受性との関連を検討した。上述の実験の温度条件(昼:20℃,夜15℃)では、子葉の生長はUV-B照射により阻害されたが、温度を昼夜とも25℃一定にした場合には、子葉の生長に対してUV-B照射は大きな影響を及ぼさなかった。このことより、植物の生育温度によりUV-Bに対する感受性が変化することが明らかになった。

次に、温度25℃一定で生育させた芽生えを高濃度の大气汚染ガスに短時間暴露し、UV-B照射が汚染ガスに対する植物の抵抗性にどのような影響を与えるかを検討した。二酸化イオウ(SO₂)ガスに暴露した場合+UVで生育させた芽生えでは、-UVの芽生えに比べて脱色等の可視傷害がより顕著であった。しかし、オゾン(O₃)に暴露した場合には、-UVと+UVの間で傷害の発現に差は見られなかった。この結果より、生長に顕著な影響を与えない条件下でも、UV-B照射により大气汚染ガスに対する抵抗性が変化すること、またこの変化の程度は汚染ガスの種類により異なることが明らかになった。ガス暴露時の子葉の蒸散速度には、-UVと+UVの間で差が見られず、子葉中に吸

図-4 キュウリ子葉の生体内物質含有量に及ぼすUV-B照射の影響

実験開始後8日目の対照区(-UV)の値を100%として、それぞれの値を相対値で示した。

□: 実験開始時, □: -UV 8日目, ▨: +UV 8日目

*はP<0.05で対照区に対して有意差があることを示す。

収された汚染ガスの量はほぼ等しいと考えられる。それにもかかわらず、 SO_2 による傷害発現がUV-B照射により顕著になることから、植物の細胞内における SO_2 の解毒能力¹¹⁾が、UV-B照射により低下したと思われる。また、 O_3 では差が見られないことから、植物の SO_2 と O_3 の解毒機構が異なることが推測され、この点も興味深い。

4. UV-Bの生態系に及ぼす影響

UV-Bの植物への影響を検討した知見の多くは、農業植物を対象としたものであり、木本植物や下等維管束植物に関するものはほとんどない。また、地球上の10の主な生態系のうち調べられているものは4つしかなく、そのうち温帯の森林や草原に関しては、限られた予備的なデータがあるだけで、地球規模における生態系の構造や生産力に対するUV-B放射量の増加の影響を正しく評価することは困難である。

現在までに研究が進んでいる草本の農業植物を用いた研究の結果によると、UV-Bに対する感受性が植物種間で大きく異なることから、UV-B放射量の増加が植物種間の競争関係に影響を与えると推測される。その結果、他の物理的要因(季候、土壌・水条件等)や生物的要因(疾病、昆虫等)の変化と結びつくことにより、オゾン層の破壊によるUV-B放射量の増加が生態系に大きな変化をもたらす可能性が考えられる。

5. ま と め

UV-B放射量の増加が植物に及ぼす影響はさまざまであり、また植物の種や品種によりその度合いは異なると考えられる。そのうち、比較的多くの植物で共通して見られる反応を表-2に示す。これらの反応から、UV-B放射量が増加した場合、少なくともある種の農作物では、収量の減少や品質の低下が起こる可能性が考えられる。しかし、これらの影響に関する現時点における知見は多くの点で不十分であり、今後、研究対象とする植物種や生態系の範囲を広げること及び他の環境要因の変化とUV-Bとの複合影響を解析することが、オゾン層の破壊がもたらすと予想される環境影響を正しく評価する上で重要であると考えられる。

表2 UV-Bが植物及び生態系に及ぼすと予想される影響

UV-Bに対する植物の反応

生長阻害

葉面積・生重量・乾燥重量—減少

葉の厚さ—増加

生体内物質含有量変化

葉の表面—ワックス状の物質の蓄積

葉内—紫外線吸収物質の蓄積

——一次代謝産物の減少

環境要因に対する感受性変化

水ストレスに対する感受性—増大

大気汚染物質に対する抵抗性—低下

UV-B放射量の増加による環境影響

農作物—収量・品質の低下

生態系—組成・分布の変化

参 考 文 献

- 1) U. S. Standard Atmosphere (1976)
- 2) WMO Report No 16 Atmospheric ozone (1983)
- 3) R. M. Klein ; Photochem. Photobiol., **29**, 1053 (1973)
- 4) M. M. Caldwell ; Photobiology, **6**, 131 (1971)
- 5) R. B. Setlow ; Proc. Natl. Acad. Sci., **71**, 3363 (1974)
- 6) M. M. Caldwell ; Encyclopedia of Plant Physiol., **12A**, 169 (1981)
- 7) D. Steinmuller and M. Tevini ; NATO ASI Series G, **8**, 261 (1986)
- 8) C. J. Beggs, U. Schneider - Ziebert and E. Wellman ; 同上, **8**, 235 (1986)
- 9) R. Robberecht and M. M. Caldwell ; 同上, **8**, 251 (1986)
- 10) A. H. Teramura, M. Tevini and W. Iwanzik ; Physiol. Plant., **57**, 175 (1983)
- 11) 田中 浄 ; 国立公害研究所研究報告, **64**, 91 (1984)