

参考資料5. 紫外線によるその他の影響

人の健康、陸域及び水圏生態系、材料への影響以外に、紫外線は対流圏での大気質や生物地球化学的循環に影響を及ぼす可能性がある。最近の UNEP の環境影響評価パネル報告書 (UNEP-EEAP, 2011) では、特に気候変化との関連からその影響評価を行っている。

ア. 大気質への影響

成層圏オゾン層の変化は気候の変化や汚染物質の排出と並んで、大気汚染に直接的な影響を及ぼす因子である。太陽紫外線は対流圏での化学過程の主要な駆動力の 1 つであり、特に、オゾンの紫外光分解は多くの揮発性有機化合物 (VOC) の大気中での寿命や大気の酸化能と密接に関わっている水酸基 (OH) の生成の引き金となっている。オゾンの光分解以外にも太陽紫外線は、アルデヒド類、NO₂、亜硝酸をはじめ紫外域に吸収帯を有する様々な化学物質を直接光分解することで、大気酸化能や様々な大気微量気体の生成・消滅に影響を与える。その結果として、太陽紫外線の変化は光化学オゾンやエアロゾルの時間的、空間的な分布に影響を及ぼす。

OH 並びに HO₂ ラジカル

メタン、HCFC、HFC などの温室効果ガスの大気寿命は OH との反応に大きく依存する。また OH や HO₂ の関与する化学過程は光化学オゾンやエアロゾルの生成に大きく影響している。よって、OH 並びに HO₂ の濃度や空間分布の把握やこれまでの変化を理解し、今後の変化を予測することがオゾン層破壊の大気質への影響を評価する上で大切である。

オゾンの光分解によって生成する励起酸素原子と水蒸気との反応は OH の主要な生成源である。過去のオゾン層破壊による紫外線の増加で OH 濃度は数%増加したと見積もられており、逆に今後のオゾン層の回復による紫外線の減少によって、OH 濃度は減少すると予想される。しかしながら、平均的な OH 濃度のトレンドや OH 濃度の空間分布の変化予測には大きな不確実性が残されている。これは、OH 濃度が単に紫外線強度のみに依存するものではなく、NO_xやメタン、VOCs、CO などの微量成分の放出量や気温、水蒸気量にも強く依存することが原因の一つである。さらに、最近の実大気中での OH や HO₂ の直接観測からは、OH や HO₂ の生成・消滅に関わる化学反応の理解が不十分であるとの指摘もなされている。例えば、実大気中で直接観測された OH 濃度が、汚染地域 (Hofzumahaus et al., 2009) 並びに非汚染地域 (Lelieveld et al., 2008) においても、数値モデルから予想される濃度に比べて数倍も高い、との報告もある。同様の観測とモデルの不一致は HO₂ でも認められており、OH や HO₂ の生成・消滅をはじめとする対流圏の化学過程の再評価が必要である。

対流圏オゾン

対流圏のオゾンは都市から地球規模のいずれのスケールにおいても注目すべき最も重要な大気汚染物質の一つである。対流圏におけるオゾンの供給源は成層圏からのオゾン流入と対流圏での光化学的なオゾン生成である。特に後者の光化学的なオゾン生成では、VOCとNO_xが関与するため、今後の対流圏オゾンの変化には、これらの汚染物質の種類やその放出量の変化が重要な因子である。さらに、太陽紫外線も対流圏オゾン量の変化に影響を及ぼす因子の一つである。

太陽紫外線は対流圏でのオゾンの生成のみならず、消失にも影響を及ぼす重要な要素である。紫外線量の増加は、清浄大気では対流圏オゾンを減らす方向に作用するが、汚染地域では増やす方向に作用すると考えられている。エアロゾルの変化も紫外線量の変化をもたらす要因の一つであり、結果として対流圏でのオゾン生成効率にも影響を及ぼす。実際、都市域でのエアロゾルの存在による紫外線量の減少も観測されており、結果としてオゾン生成を抑える可能性が指摘されている。また、植物からのVOCの放出や土壌からのNO_xの放出なども、気温、湿度、CO₂に加えて、太陽光強度に依存すると思われるため、間接的にオゾン生成効率の変化と関係する。

対流圏のオゾン量は、対流圏での光化学的なオゾン生成効率以外に、成層圏からのオゾンの流入によっても影響を受ける。成層圏オゾンの変化は、紫外線量に影響を及ぼすだけでなく、成層圏から対流圏へのオゾンの流入量にも影響を及ぼす。最近の数値モデル実験では、今後の温室効果ガスの増加と成層圏オゾンの回復は大気の循環を加速し、成層圏から対流圏へのオゾンの輸送量を増加させ、特に南半球への輸送量の増加が顕著である事が指摘されている (Zeng et al., 2010)。

対流圏エアロゾル

対流圏エアロゾルは人の健康や生態系への影響だけでなく、エアロゾルによる太陽光の散乱や吸収並びに雲核として働きを通して、直接・間接的に放射強制力に影響を及ぼす。最近の研究から、大気中のエアロゾルには有機物質で構成されるエアロゾル (有機エアロゾル) が多く存在していることが明らかになってきた。有機エアロゾルの内でも、大気中での揮発性有機化合物 (VOC) や半揮発性有機化合物 (SVOC) の化学過程を経て生成される二次有機エアロゾル (SOA) の寄与が少なくないことが分かってきた。しかしながら、従来の数値モデルが大気中で観測されるSOAの濃度を大幅に過小評価する例が報告されている (Volkamer et al. 2006)。VOCやSVOCの大気中での化学反応機構やSOA生成効率の理解が不十分であることがその一因であろう。

紫外線はSOA生成に重要であると共に、SOAの消失にも何らかの役割を果たしていると思われる。しかしながら、UV-Bの変化がSOAの収支に如何に影響するかは十分には評価されていない。一方で、エアロゾルの変化は紫外線量にも影響を及ぼす。最近の研究では、SOAの中には太陽紫外線を散乱するだけでなく紫外線を吸収する特質を有するエアロ

ゾルが存在することが指摘されている (Corr et al., 2009)。SOA が紫外線を吸収する原因として、SOA を構成する成分による吸収の寄与が指摘されている。吸収性エアロゾルの増加は紫外線量を低下させ、オゾン生成を抑える方向に働くが、散乱性エアロゾルの増加はオゾンの生成速度の増加につながる可能性がある。よって、エアロゾルによる紫外線の散乱と吸収は、放射強制力への影響だけでなく対流圏でのオゾン生成にも影響を及ぼす可能性がある。

イ. 生物地球化学的循環への影響

地球の環境中では様々な物質は輸送され、また化学的にも変質する。このような過程には、大気圏、水圏、地圏における様々な過程のほか生物活動も関与しており、放出から輸送、変質そして消失に至るシステムを全体として生物地球化学的な循環と呼んでいる。生物地球化学的な循環は、物理・化学的なプロセスや地質学的プロセス、さらには生物学的なプロセスによって構成されている。生物地球化学的循環に対する太陽紫外線の影響は、個々のプロセス間の相互作用並びに気候変化など他の環境変化による影響との相互作用が存在することにより、その評価や予測には大きな不確かさを伴うものの、決して無視できない影響があると考えられている。

炭素循環と紫外線

人間活動によって大気放出された CO₂ の吸収には陸域生態系並びに水圏生態系が大きな役割を果たしている。紫外線は生態系の活動に影響を与える因子の一つである。

陸域生態系

太陽紫外線は陸域生態系の成長と機能並びに枯れ葉や土壌からの炭素放出に関係する生物に影響すると考えられている。陸域生態系に入射される紫外線量に影響を与える因子としては、成層圏オゾン、雲、エアロゾル、地表アルベドがある。さらに、気候や土地利用の変化による生態系の変化自体も入射紫外線量の変化要因になる。

中低緯度の陸域生態系に入射される紫外線量については、成層圏オゾンの変化から予想される紫外線量の変化は小さい。むしろ雲量の減少や乾燥地域の増加並びに植生被覆の減少の影響が大きく、それらは全て林冠内並びに土壌表面への到達する紫外線量の増加につながる。一方、高緯度域では、今後の成層圏オゾンの回復による紫外線量の減少に加え、アルベドの減少、雲量の増加、茂みの増加並びに植生帯の極地方への移動などが、全て林冠内並びに土壌表面の生物に対する紫外線量の減少をもたらす。

気候の変化は陸域生態系による炭素固定に関して、北半球高緯度では増加、低緯度では減少すると予想されている。気候変化が陸域生態系に影響を及ぼし得る紫外線量の変化に影響を及ぼすことで、陸域生態系による炭素固定能への気候変化の影響を増幅させるだろうと予想される。

水圏生態系

海洋における二酸化炭素の吸収・固定は、生物活動を介した炭素吸収能、海洋の鉛直混合（あるいは成層の安定度）、海洋酸性度などに影響される。炭素固定に関わる一次生産者への紫外線ばく露量は有色溶存有機物（CDOM）の濃度や光学特性に左右される。

海洋の成層化は海表面気温の上昇や塩分濃度の低下などに依存しており、正味の一次生産性を低下させる。海洋の成層化は深部から表層部へのCDOMの供給を低下させ、CDOMの光分解の増加と合わせてCDOM濃度の低下を招く。CDOMは植物プランクトンの死骸の生物的分解によって生成されるので、生物生産性の低下はCDOMの生成量の減少につながる。その結果、海洋の成層化は生物生産性の低下を通して、紫外線の防御としてのCDOMの濃度低下を加速し、海洋表層の生物への紫外線ばく露量を増大させることになると思われる（Zepp et al., 2007）。

二酸化炭素の吸収量の増加に伴う海洋酸性化はサンゴなどの石灰化生物の石灰化を阻害し、生物生産性を低下させると考えられている。さらに、海洋酸性化が、光合成並びに石灰化のいずれに対しても、太陽紫外線の悪影響を増大させるとの指摘もある。またサンゴは海水温上昇による影響も受けやすく、温度の上昇に伴い紫外線に対する感受性も増加すると指摘もなされている。海洋酸性化の影響は、酵素による鉄の還元効率の低下に起因して、植物プランクトンによるCO₂の取り込みの低下を引き起こす可能性がある。その一方で、鉄を含んだ物質に対する太陽紫外線誘起反応が海洋酸性化による鉄の生物利用能の低下を打ち消す方向に作用するかもしれない。

微量気体やエアロゾルに対する影響

陸域生態系や水圏生態系はCO₂だけでなく、メタンや窒素酸化物を始めとする様々な微量気体やエアロゾルの生成・消失と関係している。

メタン

陸域生態系はメタンの主要な発生源の一つであるが、ほとんどが嫌気性環境下でのメタン生成に起因するものである。PEAT地帯や水田からのメタン生成に対しては、紫外線量の増大はメタンの発生量を低下させる方向に働く事が知られている。これに対し、好気性環境下で生育する植物からのメタン発生が報告された（Keppler et al., 2006）。メタン発生のメカニズムについて、これまで知られていなかった植物の細胞壁での紫外線による光化学的な反応によってメタンが生成されている事を示す結果も報告されている（Messenger et al., 2009）。なお、好気性環境下でのメタン発生が全球規模でのメタンの発生量に対する寄与見積もりは不確実性が大きい、比較的小さいとの報告もなされている（Bloom et al., 2010, Ferretti et al., 2007）。

窒素酸化物

生態系と大気との間での反応性窒素（アンモニアや窒素酸化物）の交換は、太陽紫外線

や気候変化の影響を受ける。反応性窒素と生態系の関係は、生態系への人間活動による負荷や、消失源としての植生の存在が挙げられる。また、紫外線による葉の表面での硝酸イオンや硝酸の光化学反応に伴う若葉からの NO_x (NO 、 NO_2) の放出も報告されている (Raivonen et al., 2006)。また植物と大気との間での NO_x の交換は、紫外線量や干ばつなどの気候要因に依存することも報告されている (Raivonen et al., 2009)。

一酸化二窒素 (N_2O 、亜酸化窒素ともいう) も人間活動、特に農業生産、が重要な発生源である。海洋も一酸化二窒素の発生源の一つであり、海洋への反応性窒素の負荷の増大は大気への一酸化二窒素の放出を加速する。一酸化二窒素の生成や消失に紫外線は直接的にはほとんど影響を及ぼさないとと思われるが、生物地球化学的な窒素のサイクルへの影響を通して、間接的に影響する可能性はある。

ハロゲン化物

植物は塩化メチルや臭化メチルを始めとするハロメタン類の発生源並びに吸収源の一つである。例えば、塩化メチルにとって南アメリカの森林地域は世界的に見ても主要な発生源であるが、北極域のツンドラ地域は逆に局所的な消失源となっている。

一方、海洋の生態系 (特に熱帯域の海洋) はハロメタン類の発生源であり、特に植物プランクトンからのプロロホルム (CHBr_3) の放出は CHBr_3 の主要な発生源になっている。南極海など極地域の海域でもハロメタン類の放出が認められている。南極点での塩化メチルの増加は、気候変化と紫外線誘起の光化学反応に呼応しているものと思われる。

エアロゾル

海洋からの硫化ジメチル (CH_3SCH_3 、DMS) の発生と DMS からの雲核としての硫酸エアロゾル生成を介したフィードバックの存在はガイアの仮説の例としても有名である。その DMS について、1970 年から 2000 年にかけて海洋から大気への放出量の増加に伴う DMS 濃度の増加が報告されている (Watanabe et al., 2007)。また海氷の融解による海水への DMS の放出に伴う海水中の DMS 濃度の増加も観測されている。DMS に対する紫外線量の変化の影響は複雑である。例えば、DMS を生成する藻の代謝は窒素制限下では紫外線によって高められるが、その一方で、紫外線ばく露は表層水における窒素制限を下げるため、藻の DMS 生産性を低下させる可能性がある。さらに DMS の光分解は海洋上層部での DMS の重要な消失過程になっている。

陸域生態系が関与するエアロゾル前駆物質の放出の例としては、陸域生態系からの揮発性有機化合物 (VOC) 放出が挙げられる。植物からの VOC 放出に対する紫外線影響は放出される物質の種類によって大きく異なる。例えば、植物起源の主要な炭化水素であるイソプレンやテルペン類の場合、イソプレンの放出は光強度に敏感に応答する事が知られているが、一方のテルペン類については、紫外線量と放出量の間にはイソプレンの場合ほど明瞭な関係はない。最近では、紫外線ばく露により植物から放出される VOC の中から、砂漠地域でのエアロゾル生成に関与する物質も見出されている (Matsunaga et al., 2008)。