

## 科学・環境影響評価パネル報告要旨

### 1. WMO/UNEP オゾン層破壊の科学アセスメント 2002

1987年に採択されたオゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書では、議定書締約国は、世界の専門家からなる委員会によって評価された最新の科学・環境・技術・経済面の情報にもとづいて、将来における議定書関連の政策決定を行うことが求められている。政策決定過程に情報を提供するために、オゾン層破壊に関する理解の進展状況はこれまで1989、1991、1994、1998年に評価されてきた。この情報は締約国間の論議を助け、同議定書に対する一連の改正・調整に至った。ここで要約した2002年版科学アセスメントは、このシリーズの5番目のものである。

#### <最近の主な発見と最新の科学的理解>

「オゾン層破壊の科学アセスメント：1998」の発表以来、多くの室内実験、大気観測および理論・モデル研究が新たに重要な発見をもたらし、オゾン層とその紫外（UV）放射に対する影響に関する総合的理解が深まった。その進展ぶりについて、人間活動と自然現象がオゾン層に与える影響、およびオゾン層と気候システムに関して分かった最新の研究結果の要約を以下に示す。

#### オゾン層破壊物質の変化

・対流圏（すなわち下層大気）では、各種のオゾン層破壊物質の実効的な総量は1992～1994年のピーク以来ゆっくりと減少し続けていることが観測から示されている。塩素総量は減少しているが、工業用ハロン起源の臭素量は、以前の割合（1998年のアセスメントで報告したもの）よりはゆっくりではあるものの依然増加している。2000年の時点における長寿命および短寿命の塩化炭素化合物を起源とする対流圏塩素総量は、1992～1994年のピーク時の観測値より約5%低く、1年当たりの変化率は2000年において-22ppt（-0.6%/年）であった。1-1-1-トリクロロエタン（メチルクロロフォルム、 $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ）はかつて塩素総量の減少に大きく寄与していたが、その大気中濃度が急速に減少したため、寄与は小さくなっている。主要なCFCを起源とする塩素総量は、1998年アセスメントの時点ではやや増加していたが、現在ではもはや増加していない。特に2000年には、CFC-11とCFC-113の大気中濃度は引き続き減少しており、他方CFC-12の増加率は緩やかになっている。ハロン起源の対流圏臭素総量は、3%/年の割合で増加を続けているが、これは1998年のアセスメントで報告された1996年時点での増加率の2/3に相当する。下層大気で観測されたCFC、HCFC及び1-1-1-トリクロロエタンの量は、報告されている生産量・推定放出量と整合している。

・19世紀後半以降の雪中に捕捉された空気の分析から、CFCやハロン、主要なクロロカーボン類の非工業的発生源は無視できることが確認された。前回のアセスメント以降、「万年雪空気」（つまり氷河上の雪氷に閉じこめられた空気）の分析によって、その空気が捕捉された時点の長寿命大気成分量が明らかになってきた。その結果、多くのオゾン層破壊物質の大気中濃度のトレンドは、前世紀を越えて、工業による放出が顕著になるよりずっと以前までさかのぼることができるようになった。これらの記録によれば、採取された最も古い空気中に含まれるCFC、ハロン、四塩化炭素（ $\text{CCl}_4$ ）、1-1-1-トリクロロエタン、およびHCFCの混合比は、現在のバックグラウンド大気で測定される量に比べて無視できるほど小さい。さらに、これら化合物の濃度データは、工業生産量の記録にもとづいて計算された濃度の20世紀における変遷とおおむね整合している。

濃度データからは、大気中の臭化メチルにはかなり大きな自然発生源があることが示唆され、また発生量は 20 世紀を通じて増加していることがわかった。そのため臭化メチルの全発生量に占める工業起源放出量の割合を正確に見積もることはできないが、臭化メチルの収支に関する評価結果をもとにすると、この割合の推定値は 10～40% であり、1998 年のアセスメントの報告と同じである。

・下層大気の HCFC 量は増え続けている。HCFC は、CFC、ハロンや塩素系溶媒の過渡的代替物として使用されている気体である。2000 年には HCFC は人為起源気体からの下層大気塩素総量の 6% を占めた。HCFC 起源の塩素量の増加率は、1996～2000 年の期間で一年当たり 10ppt と一定している。

・成層圏観測によると塩素総量はピークかそれに近いが、臭素量はおそらく依然として増加している。塩化水素 (HCl) と硝酸塩素 (ClONO<sub>2</sub>) の合算量は、成層圏塩素量の代用として使える。長期間にわたる地上観測によって、これらの気体の成層圏気柱全量は数十年間増加を続けていたが、近年横ばい状態になっていることがわかった。さらに、上部成層圏の塩化水素の衛星観測からも、ほぼ同じ値が示されている。1990 年代において、成層圏臭素量には増加の兆候にあるが、その変化は塩素量ほどよく把握されていない。こういった成層圏の変化は、対流圏微量ガスのトレンド、成層圏化学、及び対流圏から成層圏への輸送に関する理解をもとにした予想と一致している。

・塩素・臭素・沃素を含む極短寿命の有機ソースガスは、成層圏オゾン層を破壊する可能性があるが、その潜在力を定量的に評価することは CFC のような長寿命成分に対する程容易ではない。極短寿命化合物は対流圏で急速に化学的に分解されるので数か月以内しか大気中に存在しない。しかし、放出物や対流圏での分解生成物の一部は成層圏に達する可能性がある。例えば、おもに海洋で生成される非人為起源プロモフォルム (CHBr<sub>3</sub>) が成層圏臭素総量に寄与する割合は無視できないことが観測から示されている。極短寿命化合物によるオゾン層破壊の大きさは、放出場所と季節、そして分解生成物の性質に決定的に依存する。このため、オゾン破壊係数 (ODP) をひとつの数値で表す従来の慣用法は、長寿命物質に対しては可能だが、極短寿命物質に対しては直接適用できない。3 次元モデルによる数値シミュレーションによれば、極短寿命化合物は、熱帯で放出されると、高緯度で放出された場合よりも成層圏に輸送されやすいため、より大きなオゾン破壊につながる。3 次元モデルによって推算されるオゾン破壊係数は、複雑な輸送過程をモデル化することが困難なことから対流圏での分解生成物に関するデータ不足のため、現在のところ不確実性がある。将来の使用が提案されている化合物のひとつである n-臭化プロピル (nPB、C<sub>3</sub>H<sub>8-n</sub>Br<sub>n</sub>) についての最近の研究によれば、両極域以外の全陸域から一様に放出された場合、含まれる臭素のおよそ 0.5% が成層圏に達し、ODP は 0.04 となる。同じ研究報告によれば、熱帯での放出に対する ODP は最大で 0.1、北緯 20 度以北、北緯 30 度以北の放出に対してそれぞれ最大 0.03、0.02 となっている。したがって、極短寿命化合物の影響は、その放出量が大きければ顕著なものとなる。

### 極域および全球のオゾン層の変化

・ハロゲン化合物による春季の南極域のオゾン層破壊は過去 10 年間ずっと大きかった。1990 年代初めからオゾン気柱全量 (以下「オゾン全量」とする) の最小値は 100 ドブソン単位 (DU) 程度であった。9 月と 10 月のオゾン全量月別値はオゾンホール出現前の値から約 40～50% 少な

い状態が続いており、1週間程度の期間で見ると局所的には70%少ないところもみられる。ここ10年、春季のオゾンホール<sup>1</sup>の平均面積は拡大しているが、その増加率は1980年代ほどではない。オゾンホール<sup>1</sup>の面積は年ごとに変化しており、まだオゾンホール<sup>1</sup>の面積が最大に達したとはいえない。近年、オゾンホール<sup>1</sup>は初夏まで持続しており、それだけ紫外放射への影響を強めている。

・北極域の冬季において過去10年間で特に寒かった年には、ハロゲン化合物によるオゾン全量の消失は最大30%に達した。北極域の冬季・春季のオゾン消失は冬ごとの成層圏気象状況の変化のため大きく変動するが、新たな諸観測やモデルとの比較が行われ、今ではより良く理解されるようになった。1999/2000年冬季・春季の北極域における化学的オゾン消失量を定量的に評価した解析結果は全体的によく一致している。調査研究が良く行き届いたこの年は低温が継続するという特徴があり、高度20km付近で70%ものオゾン消失が起こり、初春までのオゾン全量の消失量は80DU(20~25%)以上に達した。対照的に、温暖で擾乱の強かった1998/1999年の北極域冬季の化学的消失量は非常に少なかったと推定される。最近4回の北極域の冬季のうち3回は温暖で、オゾン消失はほとんどなかった。ちなみに、これまでの9回の冬季のうち6回は寒冷で、オゾン消失が大きかった。

・両半球の中緯度において依然としてオゾン層は破壊されている。1997~2001年のオゾン全量の全球平均値は1980年以前の平均値より約3%少なかった。変化が観測されているのは主に中緯度と極域であり、熱帯域(北緯25度~南緯25度)では有意なオゾン全量のトレンドは観測されていない。両半球のオゾンの振舞いには違いがある。特に1997~2001年期間のオゾン全量の平均値は、1980年以前の値に比べて北半球中緯度(北緯35~60度)で3%、南半球中緯度(南緯35~60度)で6%少なかった。1980年以前と比べた1997~2001年におけるオゾン全量変化の季節的な特徴は、北半球と南半球とで異なっている。北半球中緯度では、最大のオゾン消失が冬季・春季(約4%)に見られ、夏季・秋季はその約半分である。南半球中緯度では、長期的なオゾン消失は全季節を通じて同じ大きさ(約6%)を示している。

・ハロカーボン類、ソースガス類およびエアロゾル(微粒子)の観測された変化を取り入れたモデル計算は、南北中緯度で観測されたオゾンの長期変化を良くとらえている。2次元評価モデルでも北半球中緯度オゾンの年々変動をよく再現するが、南半球についてはそれほどうまくいっていない。例えば、1990年代初めのピナトゥボ火山大噴火後のオゾンの振舞いは、観測では南北半球で違いがあるが、ハロカーボンを組み込んだオゾン化学モデルでエアロゾルを増加させた計算では、両半球で対称的な噴火後のオゾン消失が現れる。北半球中緯度のオゾン変動は、力学過程の変化で部分的に説明できるものもある。また、力学過程の変化は北半球の冬季・春季のトレンドにも影響を及ぼしている。しかし、化学過程と力学過程は互いに結合しているため、オゾン変化を単独で取り出し、予測することはできない。

・化学・気候モデルは、成層圏のハロゲンが予想通り減少すると、南極域の春季のオゾン層は2010年までには回復に転じると予測している。南極域におけるオゾン全量は、今世紀中頃までには1980年以前の値に戻ると予測されている。

・北極域のオゾン層破壊は非常に変動が大きく、予想が難しいが、南極域のようなオゾンホールが北極域で出現することはなさそうである。しかし、近年見られたようなオゾン量の低い現象は再び起きるかも知れず、北極域成層圏は、今後10年位の間は、他の擾乱(例えば火山噴火によ

る成層圏エアロゾルの増加など)の影響を最も受けやすいであろう。南極域にみられるようなオゾンの極低い状態が北極域で持続することは、最新の化学・気候モデルでも予測されてはいない。ハロゲン量が依然最大レベルに近い状況で、そのように極端なオゾン消失が今後 10 年位のうちに起こるには、約 40 年間におよぶ北半球の気象観測では見られなかった極端な気象状況が起こる必要があり、したがって将来ほとんど起こりそうもないと考えられる。

・**全球のオゾン層の回復は、主として塩素・臭素の大気負荷量の減少にかかわっていると考えられるが、他の要素も寄与しているらしい。**今後 50 年間に期待される成層圏塩素・臭素量の減少は、全球的なオゾン全量の増加をもたらすことが予想されるが、モデルによって予測増加率は異なっている。成層圏の寒冷化(主として二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の増加による)は、上部成層圏における将来のオゾン増加を促進すると予測される。しかし、オゾン全量に対するこの効果を正確に評価することは、この変化に対する下部成層圏の応答が不確実なため限定される。大気輸送の変化は予想し難く、その成層圏オゾンに対する影響は、正負いずれの方向にも働く可能性がある。メタンと一酸化二窒素の増加が全球オゾン全量の増加に及ぼす化学的影響は今後 50 年間では小さいと予測されるが、21 世紀後半には目立つようになる可能性がある。下層大気のオゾン量の将来の変化は、オゾン前駆気体の将来排出シナリオに大きく依存するが、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)2001 年報告書で採用されたどのシナリオをとっても、2050 年まで対流圏オゾンは増加するという予測になる。

### 紫外放射の変化

・**南極域の地上紫外(UV)放射量にとって、オゾンホール**の継続時間と空間的な広がりの変化の方が、年間オゾン最小値より重要である。高レベルの UV 放射量が、南極オゾンホール下の南半球高緯度域で観測され続けている。オゾンホール下では、生物学的影響の重みをつけた最大 UV 被曝量は、通常、オゾン層破壊が最大となる 10 月ではなく、太陽高度がより高くなり、しかもオゾン量が依然として低い 11 月と 12 月上旬に観測される。

・**観測が蓄積されるにつれ、オゾン全量の減少が UV 放射量の増加をもたらしていることが確認されつつある。**オゾン全量および全天日射量(全天日射計による)との関係にもとづいて計算した UV 放射量によれば、両半球中高緯度にある 10 カ所以上の観測点で UV 放射量は 1980 年代前半より 6 ~ 14% 増加したことを示している。これらの結果は、波長別の UV 放射観測および衛星観測からの見積りと整合している。地上 UV 放射に影響を与える主要な要素(例えば雲、大気中の微粒子、雪氷被覆、海氷被覆、およびオゾン全量)が空間的、時間的に複雑な分布をしていることから、観測あるいはモデルにもとづいた計算のどちらの手法によっても、地上 UV 放射量を地球規模で完璧に記述することには限界がある。前回のアセスメントでも述べられているように、1990 年代初めに開始された地上 UV の波長別観測データは、まだ観測期間が短すぎ、また変動幅が大きすぎるため、統計的に有意な長期(すなわち数 10 年単位の)トレンドの算出はできない。

### オゾン層と気候変化

・**オゾン層破壊が気候変化に及ぼす影響についての理解が深まってきた。**全球年間平均の成層圏の寒冷化が過去 20 年間に起こっており、それは大部分、観測されている成層圏オゾン層破壊、ならびによく混合された温室効果ガスおよび水蒸気の増加に帰せられる。以前のアセスメントにも述べられているように、下部成層圏が寒冷化すると地球全体の気候システムは寒冷化することになる。最下部成層圏におけるオゾン消失量の鉛直分布は、放射強制力の重要な因子であり、火

山噴火に起因する擾乱の少ない最近数年間の観測データが加わったことで、現在ではより精度よく算出することができる。平均オゾン消失量は、世界中の多くの場所において 1990 年代末の値に近いままであり、ゆえに本アセスメントで示唆する気候システムの全球平均放射強制力の推奨値は 2001 年の IPCC アセスメントで推奨されたものと同じである。1980 年以降のオゾン減少による成層圏からの放射強制力は、同期間中のよく混合された温室効果ガスの増加による正の放射強制力の約 20% を相殺している。

・ **オゾン層と気候システムの両方に影響を及ぼす大気中の変化は他にもある。** 観測により、成層圏水蒸気量が広範囲にわたり増加している有力な証拠が得られたが、これは下部成層圏を冷却する役割と化学的相互作用によりオゾン層を破壊する役割があり、それゆえ気候プロセスにも寄与する。しかし、水蒸気のトレンドは完全には定めきれず、またトレンドの原因も分かっていない。メタン、一酸化二窒素、二酸化炭素はいずれも重要な温室効果ガスであり、またオゾン層破壊にも影響力を及ぼす。さらに、地上 UV 放射量は気候変化（例えば雲量の変化など）の効果により直接的に正負いずれにも影響をうける可能性があり、全ての因子を考慮して地上 UV 放射量の長期変化を予測しようとする不確かなものにならざるを得ない。

・ **気候変化とオゾン層の回復とのつながりを探る新しい研究が始まった。** 多数の数値モデルを稼働させて、気候とオゾン層との間のフィードバックが調べられた。前述のように、過去におけるオゾン変化が、よく混合された温室効果ガスとともに、成層圏の冷却に寄与したことが数値モデルによって示された。よく混合された温室効果ガスの将来変化は化学・放射・力学諸過程を通して今後のオゾン層の変遷に影響を及ぼす。このように高度な結合系においては因果関係を決めるのは困難であり、研究は目下進行段階である。成層圏冷却（主として、推定される二酸化炭素の増加による）により、将来、上部成層圏のオゾンは増加すると予測されている。しかし、これらの変化に対する下部成層圏の応答の不確かさによって、オゾン全量に対するその効果の評価の信頼性は限定されている。

#### <科学的証拠の補足と関連情報>

##### ハロカーボン量

・ 大気中のオゾン層破壊物質のトレンドの解析結果が更新され、また万年雪空気の分析によって 20 世紀を通してのトレンドも求められた。2000 年の時点で、CFC-11 と CFC-113 の混合比は 1996 年時点よりも急速に減少しており、CFC-12 の混合比は依然増加しているが、その増え方は緩やかになった。1-1-1-トリクロロエタンは、全球的な放出量が急に減少したことにより、その混合比は 1998 年以降指数関数的に減少している。なお 2000 年時点での混合比は、1992 年に観測されたピークの値の 1/2 以下であり、その減少率は 1996 年の値のおよそ 2/3 であった。

・ 大気中の種々のオゾン層破壊ハロゲン化合物の総体としての影響は減少し続けている。これは、塩素や臭素を含む気体成分の大気測定データから等価塩素量を計算することで推定される。2000 年中頃の時点で、対流圏の等価有機塩素量は 1992～1994 年のピークの値よりほぼ 5% 少なかった。近年の等価有機塩素量の減少は、1-1-1-トリクロロエタンの減少への寄与が弱まったために、1990 年代半ばよりやや緩やかである。

・ 大気測定データから推論できるように、1990 年代の間にオゾン層破壊物質の放出が大きく減少したことは、全面的に改正・調整されたモントリオール議定書が守られ、生産と消費が規制され

たことと一致している。現在では、発展途上国における消費が全球の放出量の多くの部分を占めている。1999 年は、オゾン層破壊物質の一つのグループ（すなわち CFC）の生産と消費が全てのモントリオール議定書締約国において規制された最初の年である。大気中での測定結果は CFC 類生産量の報告値から推定された放出量と整合している。

・将来のハロカーボンの混合比に関する最新最良の推定シナリオによると、全面的に改正・調整されたモントリオール議定書が引き続き堅持されるならば、今世紀半ば頃にはハロゲンの大気負荷量は南極オゾンホール発生以前の 1980 年のレベルに戻ることが示唆される。今後さらに許容生産量を削減しても、改善はわずかであろう。

・今までのアセスメントで報告されていた HCFC-142b の大気観測値と企業報告による生産・放出量にもとづいた推定値との差は小さくなった。これは発泡剤利用分野での放出に関する見直しにより改善したことによる。

### **ハロカーボンの寿命**

・四塩化炭素の全球的寿命は約 26 年と見積もられ、前回（1998 年）のアセスメントより約 25% 短くなった。この理由は、広汎な観測により四塩化炭素が海洋表層水で未飽和となっていることが明らかにされたことから、海洋が四塩化炭素の吸収先であることが特定されたことによる。大気測定とこの寿命から推論される放出量は、2005 年の全球生産量の規制設定値より約 7 倍大きい。

・1-1-1-トリクロロエタンの寿命は新たな観測データをもとにして 4.8 年から 5.0 年に変更された。この変更は大気中の水酸分子（OH）の推定値と関係していることから、HCFC、HFC、メタン、およびこの重要なオキシダントによって大気中から除去される他のすべての気体の寿命が最大 5% 長くなることが示唆される。この結果、これらの気体の地球温暖化指数（GWP）とオゾン破壊係数（ODP）にも影響が出る。

### **臭化メチル、塩化メチルとハロン類**

・南半球の保存空気や南極大陸の万年雪空気から推量した大気の変遷史によれば、南北半球で同じ変化が起こったとする仮定の下で、臭化メチルとハロン類からなる有機臭素の総量は 1900 年代半ば以降 2 倍以上に増えたことが示唆される。

・臭化メチルと塩化メチルの発生量と消失量の見積りの間には依然として大きなずれが残っている。すなわち、この両気体とも既知の消失量は発生量を上回っている。新たな臭化メチルの発生源が種々の穀物や生態系で確認され、新たな塩化メチルの発生源も熱帯植物から見つかった。これらの発見により、当該両気体の収支不均衡の幅は狭まった。

・臭化メチルの全球的寿命の最良推定値は 0.7（0.5～0.9）年のままである。臭化メチルの消失過程の推論に直接関係する新規研究によって、不確実性はやや小さくなったが、値そのものの大幅な変更を支持するものではない。工業生産が臭化メチルの放出に寄与する割合は変更されず、発生・消失強度に関する最新の理解にもとづくと、10～40%である。

### **極短寿命オゾン層破壊物質**

・地上濃度が数 ppt である極短寿命の自然・人工起源の臭素・沃素のソースガス類は、現在の無機臭素・沃素の収支において無視できない寄与をなす。無機臭素・沃素の成層圏濃度が極めて低く、それぞれ約 20ppt および 1 ppt 以下に過ぎないからである。極短寿命の臭素ソースガス類に含まれる臭素の対流圏から成層圏への輸送は、成層圏の無機臭素収支に寄与する可能性がある。

・極短寿命物質とその分解生成物の地表から成層圏への最も効率的な輸送経路は熱帯域にある。熱帯域では、境界層から上部対流圏への鉛直輸送時間が短く、熱帯圏界面を通過して成層圏に入った空気は 1 年かそれ以上成層圏に留まる。放出された極短寿命物質のかなりの部分が熱帯圏界面領域に達していると期待される。なぜなら、最新の見積りでは、この高度域の基底部の空気は対流活動により 10 日から 30 日の時間スケールで熱帯境界層からの空気と交換されることを示しているからである。熱帯圏界面域の空気のうち数パーセントは熱帯圏界面を通過して成層圏に入ると期待される。別の輸送経路が熱帯外に存在し、極短寿命物質とその分解生成物を熱帯外の下部成層圏へ運んでいる。

・極短寿命ソースガス類の影響を見積もる際の主な不確実性は、これらの物質を成層圏に輸送する物理・力学過程とその分解生成物の化学過程にある。複雑ではあるが、3 次元数値モデルは極短寿命ソースガス類のオゾン破壊係数を見積もる際に好まれる道具である。そのようなモデルでは物理・力学過程の扱い方に大きな不確実性がある。

・時間・空間的に一様な単純化を行った海洋発生源を仮定し、2 つのモデルを用いてブromoフォルム ( $\text{CHBr}_3$ ) の大気中の分布をシミュレーションした。この結果、海洋発生源によるブromoフォルムの平均地表混合比は 1.5ppt、成層圏の臭素は約 1ppt になることが示された。また、ブromoフォルム起源の臭素のうち 1/2 から 3/4 が、分解生成無機物の形で成層圏に入ることも示された。

・nPB のオゾン破壊係数が 3 つの独立したモデル研究によって計算された。nPB は水酸分子 ( $\text{OH}$ ) との反応により分解され、その熱帯対流圏での光化学寿命は 10 ~ 20 日である。特に臭化アセトンについての実験室データは、nPB の分解生成物が 2 日より短い寿命であることを示している。3 つのうち 2 つのモデル研究では、nPB が直接成層圏に輸送された場合の値のみが得られた。3 番目の研究では、成層圏への直接的な輸送と分解生成物の成層圏への輸送の寄与を分けて計算した。後者の研究によると、オゾン破壊係数は、熱帯での放出の場合最大 0.1、北半球中緯度に限定された放出の場合 0.03 となった。また、いずれの場合も係数の内訳は、約 2/3 が分解生成物の成層圏への輸送によるものであった。

・沃素の化学過程に関する実験室データによって、成層圏オゾン層破壊に対する沃素の効率は下方修正された。この修正された効率係数 (約 150 ~ 300) は臭素の係数 (約 45) より依然として大きい。

## 極域オゾン

### (南極域)

・春季の南極域上空のオゾン消失は非常に大きいままで (日々の局所的な気柱全量は、オゾンホール出現前の状況より 60 ~ 70% 少ない値に達する)、1990 年代初めから毎年 100DU (ドブソン

単位)程度の最低値が現れている。この観測結果は、高度 12~20km の範囲ではほとんど完全にオゾンがなくなっていることを反映しており、オゾン層回復が始まったことを意味しない。このような低いオゾン量は成層圏化学・力学の最新の理解と一致している。

- ・220DU の等値線で囲まれる面積(オゾンホール)の激しさの指標)は、近年も増加を示している。まだオゾンホールが最大に達したということとはできない。変化の多くは、極渦(極夜渦ともいう)周辺の諸過程に関係しているらしく、気象の変動性とほぼ一定のハロゲン負荷量とで話のつじつまは合う。

- ・観測によると、南極域の極渦とそれに伴うオゾンホールは、1980年代よりも遅くまで持続している。極渦は、11月初めには崩壊していた1980年代とは対照的に、最近10年間総じて11月後半から12月初めに崩壊している。

- ・衛星およびラジオゾンデの観測によると、春季の南極域下部成層圏は寒冷化している。1979年から2000年の期間について、南緯70度における寒冷化の直線トレンドは10年あたり1.5Kを超えている。モデル研究によって、オゾン消失が春季の寒冷化と南極域極渦継続の長期化の主な原因となっていることが再確認されている。よく混合された温室効果ガスの増加は、年平均の寒冷化に寄与している。成層圏の水蒸気の増加も寄与していると思われる。

- ・ハロゲン類およびよく混合された温室効果ガスの変化の結合効果を含んだ化学・気候結合モデルによるシミュレーションは、南極域上空におけるオゾン全量の過去のトレンドを大まかに再現できる。これらのモデルでは、2010年以前にオゾン全量の最低値が現れ、1980年レベルへの回復は今世紀中頃と示唆している。過去と将来の変化に対するモデルの応答は、主に成層圏のハロゲン負荷量の変化によって駆動されており、オゾン層の回復はハロゲン負荷量のピークの後に起こる。

### (北極域)

- ・最近10年間の冬季において、北極域におけるハロゲンによるオゾン消失の大きさに関しては、観測にもとづいた様々な手法で研究が進められてきた。化学的な消失量の見積りは、異なる解析結果の間で大まかに良い一致がある。最も総合的な研究がなされた1999/2000年の冬季では、北極域成層圏の高度20km付近では20%以内の範囲で一致した。

- ・北極域の冬・春季のオゾン全量は、大きな経年変化を示し続けており、北半球成層圏の変わりやすい気象を反映している。低オゾン全量は1999/2000年の寒い冬季に出現した。この年は、低温が継続した点、局所的に高度20kmで70%の消失が起こった点、および全量の消失が80DU(約20~25%)より大きかった点で特色があった。1998/1999年、2000/2001年のより温暖で擾乱が強かった冬季は、非常に少ないオゾン消失が観測された。最近4回の北極域の冬季のうち3回は暖かくてほとんどオゾン消失はなく、その前の9回の冬季のうち6回は寒くて大きなオゾン消失が起こった。

- ・気温の低かった北極域の冬季で何回か、1月に下部成層圏において顕著な化学的オゾン消失(約0.5ppm)が観測され、冬季を通じての全消失の約25%を占めた。観測によると、消失は空気塊が太陽光にあたる期間にのみ生じることが示される。しかし、こうした1月のオゾン消失は光化



学過程の最新知識をもってしても全部は説明しきれない。

・化学・気候結合モデルは、北極域のオゾン量の典型的な年々変動をよく捉えている。北極域の気温はしばしば、極域成層圏雲形成の、したがって化学的擾乱が始まる閾値近くになるため、わずかに数度のモデル気温のバイアスに対してもモデル結果は敏感である。この点が、北極域における冬季オゾンの振舞いについて、過去をシミュレートし将来を予測するモデルの能力に厳しい限界を与えている。

・このアセスメントのために多くの化学・気候結合モデルを稼働させた結果、北極域におけるオゾンの最小値は今後 20 年以内に起こり、そのタイミングは気象条件に依存することが示唆される。ここ数年見られたような低オゾン量は再び出現するかもしれないが、北極域成層圏は今後 10 年程度他の擾乱（例えば、火山爆発によるエアロゾル）に対し最も傷つきやすいであろう。（前回のアセスメントで考慮した初期の簡易計算結果とは対照的に）これらのモデルでは、北極域のオゾン全量が南極域で見られるような極端に低い値になることは予測されていない。このような極端に低い値になるには、北半球の気象観測において過去約 40 年間先例のなかった気象条件が必要である。

・衛星およびラジオゾンデ観測によって、春季の北極域下部成層圏は寒冷化していることが示されている。しかし、北極域の春季の変動が大きいいため、そのトレンドの大きさは不確かである。1979～2000 年の期間、北緯 70 度では直線的な減少トレンド（10 年当たり 1.5K を超える）が観測されている。数値モデル研究によれば、成層圏オゾン層破壊は 1979～2000 年間の北極域下部成層圏の春季の寒冷化に重要な影響を及ぼしていることが示唆されるが、その寄与の度合いの見積りは、この領域の大きな力学的変動によって妨げられる。

・直接測定とリモートセンシング手法による冬季北極域極渦内の一酸化臭素（BrO）の観測結果はおおまかに一致しており、約  $20 \pm 4$  ppt という臭素総量の収支とつじつまが合っている。BrO 気柱量の緯度・季節・日変動のモデル研究結果は、多数の地上観測値とよく一致しており、極域における臭素含有成分間の配分とその収支を支配する過程が合理的によく理解されていることを示している。

・臭素の測定によって、極域のオゾン消失に対する臭素の寄与をより正確に見積もることができるようになった。現在、全オゾン消失における臭素の寄与は 30% から 60% の範囲で、その大きさは気温と一酸化塩素（ClO）の量に依存する。塩素の発生源強度の横ばいが観測されていることを考慮すると、現在の臭素ソースガスの増加トレンドが反転するまでは、極域のオゾン消失における臭素の役割は、塩素に対して相対的に増加し続けるであろう。

・寒冷な冬季には、北極域下部成層圏において窒素化合物の除去（脱硝）が起こることが観測されている。1999/2000 年の冬季下部成層圏では、反応性総窒素が最大 70% 除去されているのが観測された。観測とモデルの結果によると、1999/2000 年の北極域下部成層圏における脱硝により、高度 20km で春季に最大 30% もオゾン消失を増加させたことが示される。

・1999/2000 年の北極域下部成層圏において、硝酸を含む大粒子（直径 10～20  $\mu\text{m}$ ）が発見されたことにより、脱硝を引き起こす原因についての理解がかなり改善された。これらの粒子の生

成機構ははっきりしないが、粒子の沈降により北極域で観測される脱硝を説明できる。したがって、これまで全球成層圏モデルで一般に仮定されてきたメカニズムである、溶解硝酸を含む氷晶の沈降は、北極域における主要なメカニズムではない。

- ・液滴および固体の極域成層圏雲粒子の化学組成が初めて直接測定された。測定された組成のほとんどは、成層圏モデルで多年用いられてきた液滴粒子および硝酸三水和物のモデル計算と一致している。これらの測定によって、極域オゾン消失のシミュレーションの核心である微物理モデルで用いられる粒子種別の信憑度が改善される。

## 全球オゾン

### (オゾン全量)

- ・1997～2001年の期間の全球平均オゾン全量は、1964～1980年の期間の平均より約3%低い。組織的な全地球的観測が始まって以来最低の年平均全球オゾン全量は1992～1993年に見られた(1980年以前の平均値に比べ約5%低い)。これらの変化は既存の全球データセットのいずれにおいても明らかである。

- ・1980～2000年の期間、熱帯域(南緯25度～北緯25度)では、オゾン全量に有意なトレンドは観測されていない。この領域では、10年単位でのオゾン全量の変化(山と谷の間の振幅は約3%)が観測されており、これは11年の太陽活動サイクルとほぼ同期している。オゾン全量のトレンドは、両半球とも25度から35度の緯度帯で統計的に有意となっている。

- ・両半球のオゾン全量の振舞いには多くの点で違いがある。

- ・1997～2001年の期間の平均では、1980年以前の平均値に比べると中緯度(35度～60度)のオゾン全量は北半球で3%、南半球で6%低かった。

- ・オゾン全量変化(1980年以前の平均値と比べた1997～2001年の期間の相対的な)の季節による違いは、熱帯外の南北半球で異なっている。北半球中緯度では冬季から春季の間に比較的大きなオゾン減少(約4%)が見られ、夏季から秋季にかけての減少は約半分であった。南半球中緯度では、オゾン全量の長期的減少が全季節を通じて同じ大きさ(約6%)であった。

- ・顕著な負の異常が北半球中緯度で1992～1995年の冬季から春季にかけて毎年観測されている。同様の異常は南半球中緯度では見られない。

- ・南半球中緯度で1985～1986年にオゾンの急激な減少があった。同様の減少は北半球では観測されていない。

### (オゾン鉛直分布)

- ・「成層圏エアロゾル・ガス実験」(SAGE)衛星観測器から求められたオゾン分布のトレンドによれば、北緯60度から南緯60度の高度35～50km(40km付近に極値を持つ)で、有意な減少傾向が見られる。1979～2000年の期間、10年で-7%から-8%という最大の減少トレンドが両半球の緯度35度から60度の範囲で観測されており、両半球で有意な違いはない。この衛星観測の結果は独立したオゾン反転測定による北半球中緯度での結果とよく一致している。

・最新の SAGE のデータによると、高度 30km 以上のオゾンの少ない領域で、有意なオゾン減少トレンドが熱帯域に広がっているのが見られる。これは短期間のデータをもとにしていた前回のアセスメントでは見出されなかったことである。

・上部成層圏で観測されたオゾン層破壊は、観測されている人為起源の塩素量の変化と一致している。上部成層圏のトレンドの鉛直・緯度面分布は光化学モデルで再現されるが、その変化の大きさは、気温とメタン ( $\text{CH}_4$ ) の共存しているトレンドに対して敏感である。

・長期にわたるオゾンゾンデによる測定に関しては、主として北半球中緯度のデータ利用が可能である。高度 20~27km のオゾンは、1980~2000 年の期間連続的に減少したが、一方高度 10~20km のオゾンは 1990 年代の初めに減少し、それ以後は比較的一定であった。そのような変化は北半球中緯度でのオゾン全量の変化と一致している。

### (オゾン関連微量成分)

・過去 25 年間の成層圏エアロゾルの変動は、時々起こる火山噴火による影響とその後の回復が主なものであった。1991 年のピナトゥボ火山の大噴火に続いて、火山噴火の影響のないレベルに向かっての減衰が少なくとも 1999 年まで続いた。現在のところ火山起源以外のエアロゾル量にトレンドがあるとする証拠はない。

・1 観測点 (米国コロラド州ボルダー、北緯 40 度) における 1981~2000 年の期間の成層圏水蒸気の測定によると、高度 15~28km で 1 年当たり約 1% の統計的に有意な増加が示されている。1991~2001 年の期間のより短期間でみると、北緯 60 度から南緯 60 度をカバーする全球的な衛星測定によれば、高度約 25~50km で 1 年当たり 0.6%~0.8% の同様なトレンドを示すが、それより低高度では有意なトレンドは見られない。この水蒸気の増加は対流圏のメタンのトレンドによって説明できる量よりずっと大きい。全球での長期間の測定データが不足しているため、成層圏水蒸気のトレンドを特徴づけることは限られたものとなっている。

・1981~2000 年の期間のニュージーランドのローダー (南緯 45 度) および 1985~2000 年の期間のスイスのユングフラウヨッホ (北緯 46 度) における成層圏二酸化窒素気柱量の測定によれば、10 年当たり約 5% という統計的に有意な増加トレンドが示されている。エルチヨン火山とピナトゥボ火山噴火後の一時的な減少も観測されており、これは硫酸エアロゾル粒子表面における不均一反応 (異相化学反応ともいう) を含む数値モデルによって大まかには再現される。

### (成層圏気温)

・観測によると、年間かつ全球平均では成層圏は最近 20 年間にわたって寒冷化している。下部成層圏において 1990 年代終わりの全球年平均気温は、1970 年代の終わりに比べ約 1K 低い。過去 20 年間の下部成層圏の年平均の低温化が目立つのは、両半球の中緯度 (10 年当たり 0.6K) であるが、赤道付近では有意なトレンドは見られない。上部成層圏の年平均気温のトレンドはより大きく、1979~1998 年の期間で全球的にほぼ一様な寒冷化で、成層圏界面 (高度約 50km) 付近で 10 年当たり 2K となっている。

・モデル研究によれば、オゾン、よく混合された温室効果ガス、および成層圏水蒸気の変化によ

って、過去 20 年間に観測された全球および年平均での成層圏の寒冷化の主要特徴を説明することができる。下部成層圏においてはオゾン層破壊による寒冷化が、よく混合された温室効果ガスによる影響を凌駕しているが、上部成層圏の気温トレンドでは、よく混合された温室効果ガスとオゾンの変化の影響はほぼ同程度である。

### （過去のオゾン変化の原因）

- ・ 中緯度におけるオゾン変化の高度・緯度・季節的な特徴は、ハロゲン類が主要原因であるという理解と大まかに合っている。これは 1998 年のアセスメントから得た同様の結論に沿っている。

- ・ ハロカーボン類、ソースガス類、エアロゾルの観測された変化を組み込んだアセスメントモデルは、1980～2000 年の期間の中緯度（北緯 35～60 度および南緯 35～60 度）で観測されたオゾン全量の長期的な変化を、モデルと観測が持つ不確実性の範囲内で大まかに再現している。しかし、南半球中緯度に対するモデル結果の差異の幅は大きく、少なくともその一部は南極オゾンホールへの扱い方の違いによるものである。そのうえモデルでは、1990 年代初めのピナトゥボ火山噴火後のオゾン消失の化学的徴候は両半球で対称であったはずであることを示唆しているが、観測では中緯度で南北半球間でかなり非対称であった。

- ・ 観測された大気力学的な変化が、10 年の時間スケールで北半球中緯度のオゾン全量に有意な影響を与えているという証拠が増している。自然変動性、温室効果ガスの変化、そしてオゾン全量それ自身の変化が全て、この力学的な変化に寄与しているようである。また、化学過程と力学過程は相互に結びついているので、オゾン変化への寄与を個別に取り出して見積もることはできない。

### （将来のオゾン変化）

- ・ 今後 50 年間に予期される成層圏塩素負荷量の減少は、全球のオゾン全量の増加をもたらすと予測されるが、2 次元アセスメントモデルの間でその増加率は異なっている。将来のオゾン量は他の大気組成の変化および気候変化によっても影響されるだろう。年々変動があるため、オゾン全量が横ばいになったことを証明するには 10 年程度の期間がかかるであろう。

- ・ 成層圏の寒冷化（主として予想される二酸化炭素の増加による）および成層圏メタンの増加による化学的影響は、上部成層圏におけるオゾンの将来増加を促進すると予測されている。しかし、オゾン全量に対するこの効果を高信頼度で見積もることは、この変化に対する下部成層圏の応答の不確実性によって制限される。

- ・ 予想されるメタン（ $\text{CH}_4$ ）および一酸化二窒素（ $\text{N}_2\text{O}$ ）の増加（IPCC2001 シナリオに基づく）が全球オゾン全量の増加率に及ぼす影響は今後 50 年間では小さいと予測されている。塩素の変化が主要な作用をするからである。その後は、メタンと一酸化二窒素の変化は相対的に重要度を増してくる。

### （紫外放射）

- ・ 全天日射計（全天日射量）、オゾン全量およびその他の気象測定データから再現された年平均紅斑紫外放射量は、中・高緯度の測定点において最近 20 年間に 6～14% 増加した。全天日射計とその他の気象データは、紫外（UV）放射に影響するオゾン以外の変数を代替する。測定点の中

には、変化のおよそ半分はオゾン全量の変化に帰因できるところもある。この再現は実際の UV 測定ではないし、放射伝達の性質についての仮定もいくつかある。また、この再現が全球スケールで代表性があると考えてはならない。地上観測をもとに再現したデータから導かれた UV 放射照度の増加は、1980 年代以降に生じた長期変化の明確な指標となると信じられる。

- ・ 長期的な UV の変化が、オゾンだけでなく、雲量、エアロゾル、地表アルベドなどの変化によっても駆動されることには明白な証拠がある。これらの要因の相対的重要度は地点ごとの条件に依存する。地上および航空機搭載測定器を用いた研究結果によると、UV 放射照度に対する対流圏エアロゾルの影響は従来考えられていたよりも大きく、全球にわたり広範囲に影響していることが示唆される。

- ・ オゾン減少に伴う UV の増加は、ヨーロッパ、南北アメリカ、南極大陸、それにニュージーランドなどの多くの測定点における波長別測定によって観測されている。低いオゾン全量に伴って UV 放射照度が増大する事態が中・高緯度の春季に起こり続けている。

- ・ オゾン全量マッピング分光計 (TOMS) の衛星データをもとにした地上 UV 放射照度の見積りは、前回のアセスメント以来さらに多くの測定点での地上測定結果と比較された。一般にこの見積りは短期および長期の変動を捉えているが、多くの測定点で地上測定値よりも系統的に高い。月平均の紅斑紫外放射照度の偏差は、清浄な測定点での 0% から、北半球の 1 地点での最大 40% までの範囲におよぶ。清浄な測定点ほどよく一致するという事実から、この差は地表付近のエアロゾルおよび (または) 汚染物質に起因すると示唆される。他の衛星データから求められた補足的影響変数 (例えば雲量やアルベド) を含んだ新しい UV 分布図は、TOMS あるいは全球オゾン監視実験 (GOME) のオゾンデータと併用すると、地上データとの一致はよくなる。

- ・ 南極域ではオゾン層破壊が UV 放射照度増加の主原因である。このため UV 放射量の将来変遷はオゾン回復に追従すると考えられる。しかし、雲被覆、エアロゾル、または雪氷被覆など他の影響因子の変化のため、UV 放射はオゾンホール以前の値にぴったりとは戻らないかもしれない。

- ・ 北極域を含む他の場所でも、他の影響因子の UV 放射に対する影響の度合いはオゾン層破壊による影響と同じくらいである。他因子が起す将来変化の不確実性が大きいいため、UV 放射照度の将来変遷についての信頼性の高い予測は妨げられている。さらに、気候変化がもたらす雲量および雪氷被覆などの変化は季節・地理的依存性があり、このことで世界各地における将来の UV 放射照度には差が出てくると考えられる。

- ・ ヨーロッパ上空における雲量変化による影響に関して TOMS 衛星データを再処理した結果、場所によってはオゾン層破壊による UV の増加が雲量の増加で部分的に隠されてしまうことが確認された。

### <政策形成のための留意事項>

30 年以上にわたる研究の結果、人類とオゾン層との相互作用について次第により良い理解が得られるようになった。オゾン層破壊物質の役割に関する新しい政策関連の洞察は、国際的に最高の英知を集めた評価過程を経て、政策決定者にもたらされてきた。ここで要約した「オゾン層

破壊に関する科学アセスメント 2002」の中の研究成果は、オゾン層保護に関わる政府、産業界及び政策決定のためにもたらされる直接的な最新の科学情報である。

・ **モントリオール議定書は機能しており、議定書で規制された物質によるオゾン層破壊は今後 10 年程度以内に改善し始めると予想される。** 議定書の効果は現在および今後もいくつかの指標によって示される。全球観測によれば、人為起源の含塩素・含臭素オゾン層破壊気体の実効的な総量は、下層大気(対流圏)において 1992～1994 年の間にピークに達し、その後減少し続けている。さらにオゾン層破壊気体の成層圏濃度は、現在ピークかピークに近いことが観測から示されている。このため、他の全ての影響が一定と仮定すると成層圏オゾンは増加するはずであるが、オゾンの持つ変動性のため、長期的な回復の開始を検出するのは難しい。予測によれば、全ての国々が改正・調整された議定書に従ったと仮定して、1980 年代始めに初めて発見された南極域のオゾンの“穴”(オゾンホール)は今世紀の中頃までにはなくなると - ここでも他の全ての影響が変わらないと仮定して されている。

・ **議定書の完全遵守をもってしても、オゾン層は特に今後 10 年程度は脆弱のままである。** オゾン層破壊物質の大気総量が最大に近いことから、人間活動の影響による擾乱は最大もしくは最大に近いであろう。1980 年時点でのオゾンホール以前の量と比較して、1997～2001 年のオゾン全量の消失量は以下のとおり。

- 北半球中緯度の冬・春季で約 4%
- 北半球中緯度の夏・秋季で約 2%
- 南半球中緯度の通年で約 6%

このオゾンの変化に対応して、雲などの他の影響が一定であれば、地表の紅斑紫外放射は少なくともそれぞれ 5%、2%、7%の増加と算出される。南極大陸では、9 月と 10 月の月平均オゾン全量はオゾンホール以前より約 40%から 55%低いままであり、1 週間程度の期間で見ると局所的には 70%も少ないこともある。北極域のオゾンは大いに変動しやすい。最近 4 年間の冬・春季のオゾン全量の累積消失の見積りでは最大約 25%にも及ぶ。これに対応する地表の紅斑紫外放射の増加を算出すると、南極域の春季では約 70～150%であり、短期的で局所的なオゾン消失に対しては最大 300%増加となる。北極域の冬・春季では最大 40%となる。さらに、1991 年のピナトゥポ火山のような大噴火による成層圏微粒子量の増加があると、オゾン全量の最大消失と UV 放射増はさらに大きくなる。変動の大きな北極域では、1999/2000 年の冬・春季のような異常寒冷が続いた北極域成層圏の冬季には、より大規模なオゾン層破壊が起こるだろう。反面、特に温暖な年にはオゾン層破壊はより小さいと予測される。

・ **オゾン層の回復を促進する手段は限られている。** 本評価報告では、オゾン層破壊物質の人為的生産を 2003 年に全地球的に停止するか、あるいはオゾン層破壊物質の人為的放出を 2003 年に全地球的に停止した場合に達成できる改善の上限について仮想的な見積りを行った。

特に、生産に関しては、1980 年のレベルを超える等価有効成層圏塩素負荷量を、2002 年から 1980 年のレベルに戻る年(2050 年頃)まで積算した量は、現行の規制基準(1999 年北京会議)と最近の生産データと比べて以下の割合だけ減少させることができる。

- HCFC の生産を 2003 年に停止すれば 5%、
- CFC の生産を 2003 年に停止すれば 4%、
- 臭化メチルの生産を 2003 年に停止すれば 4%、

- ハロン類の生産を 2003 年に停止すれば 1%、
- 1-1-1-トリクロロエタンの生産を 2003 年に停止すれば 0.3%。

有意なオゾン消失が初めて検出された 1980 年からの積算負荷量と比べてみると、上記の百分比の値はそれぞれ約半分になる。仮想的に、全てのオゾン層破壊物質について人為的生産を全廃すると、成層圏負荷量が 1980 年以前の値に戻る時期は約 4 年早まるであろう。

放出に関しては同様に、1980 年のレベルを超える等価有効成層圏塩素負荷量を、2002 年から 1980 年のレベルに戻る年（2050 年頃）まで積算した量は、以下の割合だけ減少させることができる。

- ハロン類の放出を 2003 年に停止すれば 11%、
- CFC の放出を 2003 年に停止すれば 9%、
- HCFC の放出を 2003 年に停止すれば 9%、
- 臭化メチルの放出を 2003 年に停止すれば 4%、
- 四塩化炭素の放出を 2003 年に停止すれば 3%、
- 1-1-1-トリクロロエタンの放出を 2003 年に停止すれば 2%。

ここでもまた、有意なオゾン消失が初めて検出された 1980 年からの積算負荷量と比べてみると、上記の百分比の値は約半分になる。仮想的に、全てのオゾン層破壊物質の工業生産に由来する放出を全部停止すると、成層圏負荷量が 1980 年以前に戻る時期は約 10 年早まるであろう。

**・モントリオール議定書の遵守が履行されなければ、オゾン層の回復は遅れるか、あるいは妨げられることさえありうる。**例えば、オゾン層破壊物質の生産量が 1999 年時点の値で一定して続いた場合、オゾン層の回復は 2100 年をかなり過ぎてからになるであろう。オゾン層破壊物質の生産に関するモントリオール議定書の規定を厳守することによってのみ、オゾン層破壊気体の大気総量が南極オゾンホール以前の値にまで減少させることができるのである。

**・極短寿命オゾン層破壊物質のオゾン層破壊への影響を評価するには新規手法が必要であり、議定書締約国の求めに応じ、このアセスメントではそのうちのひとつの科学的手法について述べた。**オゾン層破壊係数（ODP）をひとつの数値で表す従来の考えは、極短寿命のオゾン層破壊物質には直接適用できない。なぜなら、それらのオゾン層への影響は放出時期や放出場所に依存するからである。それらの影響は、放出の量、時期、場所を考慮してケースバイケースで算出する必要がある。このような見積りを行うことによって、これら極短寿命物質（例えばプロモフォルム）の自然放出源の成層圏における寄与を洞察し、その工業的生産・使用（例えば、nPB）に係わる政策決定に科学的情報を提供することができる。

**・オゾン層破壊と気候変化の問題は相互に結びついている。**オゾン層破壊の現象と地球温暖化現象は、多くの共通した物理・化学過程を分けあっている。例えば、CFC の大気中の量がモントリオール議定書の規定によって減少すると、その地球温暖化に対する寄与も減少する。一方、CFC の代替物質である HFC や HCFC の利用は、これらの地球温暖化への寄与を増加させる。実際に、HFC、HCFC ならびにフッ化水素（HF）の多数の全球的観測から、それらの寄与が現在増加中であることが確認されている。他の例をあげると、地球温暖化への役割に係わる、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素に対する今後の政策決定は、成層圏オゾンにも直接的・間接的に影響を与えるであろう。また、オゾン層破壊は気候システムを寒冷化するように働くので、今後数 10 年にわたるオゾン層の回復は結果的に気候システムを温暖化することになるろう。

## 2. UNEP オゾン層破壊及びオゾン層破壊と気候変動との相互作用による環境影響のアセスメント 2002

### オゾン層と紫外線の変化

・大気中のオゾン層は破壊状態が続いている。南極域のオゾンは、毎春、近年は同程度の減少が見られている。北極域におけるオゾンの減少はかなりの量であるが、減少が起きるのは冬季の成層圏の気温が臨界値を下回った時だけである。極域以外では、オゾン量の減少はそれほど大きくない。1997～2000年の南半球中緯度のオゾン全量は、1980年と比較すると、年間約6%減少していた。北半球中緯度のオゾン全量は、冬季と春季に約4%、夏季と秋季に約2%減少していた。熱帯地方では、オゾン全量に有意な変化は起きていない。全球では、オゾン量の減少率は年平均約3%である。これらの変化は、モデルを使った計算結果とも大筋で一致している。

・地上での紫外光照射量の観測は、その質、量、利用可能性とも改善され続けているが、地球規模での評価に利用できるまでにはなっていない。観測あるいはモデルに基づいた手法を用いても、地表面の紫外光照射量に影響を与える主な変数（例えば、雲、浮遊微小粒子、積雪、海氷、オゾン全量）の複雑な空間的、時間的分布により、地球規模での地表面紫外光照射量を十分に説明するには依然として限定的である。

・地上の波長別紫外線データは1990年代初めから記録されているが、まだ観測期間が短く、また変動が大きいため、統計的に有意な長期的（即ち数十年間の）傾向を計算することはできない。しかしながら、最大紫外線量の長期的な増加が数か所で認められ、その計測された増加はモデルを使った計算結果とも一致している。気象観測網から得られる全天日射の計測と関連づけて、衛星でのオゾン量計測から、紫外光照射量の歴史的な変遷を推察するという進歩が見られた。

・雲量や積雪量の変化は、紫外光照射量に長期的な影響を与えることが認められた。カナダの3つのうち2つの地点におけるUV-B照射量の増加は、成層圏で起きたオゾン量の変化から予想されたとおりであった。一方、残りの地点においては、積雪量や雲量の長期的変化が加わり、その結果、UV-B照射量の増加傾向は予想より大きかった。このことは気候変動とUV-B照射量の間に潜在的に複雑な相互作用があることを示す。衛星によって計測される雲の反射率は、いくつかの地域（例：南極大陸）で長期的な増加が見られ、それはUV-B照射量を減少させる傾向にある。その他の地域（例：熱帯地方）では、雲量が減少している。これらの雲量の変化は、モデルによってまだ十分に説明できない。雲量と対流圏の大気質（特にエアロゾル）は、地表における紫外線暴露を大きく変える可能性がある。

・人為起源のエアロゾルは、以前に想定されていたよりも紫外光照射量を弱めるのに重要な役割を担っている。地上で観測された紫外光照射量データと衛星で観測されたデータを比較すると、衛星での観測結果は汚染された地域で過大であることから、エアロゾルは以前に考えられていたより重要である。都市や工業地帯に起因する汚染の影響は、より広範囲に拡大する可能性がある。バイオマスの燃焼は粒子と気体成分を増大させ、地上及び対流圏のUV-B照射量を減少させることがある。

・よく混合された温室効果ガスの将来変化は、化学的、放射的、および力学的なプロセスを通して、将来のオゾン層の変動に影響するだろう。この高度に結合されたシステムにおいて、これら



の要素の相対的な重要性を評価することは難しく、研究は継続中である。成層圏の寒冷化（主に予想される二酸化炭素の増加による）は上部成層圏でのオゾン量を増加させると予想される。しかしながら、これらの変化に対する下部成層圏の反応が不確実なため、オゾン全量へのこれらの影響に関する信頼しうる評価は、限りがある。

## 健康

・最近の研究においても、UV-B の眼、皮膚、免疫システムに与える悪影響が確認され続けている。健康影響に関しての新たな発見はないが、UV-B の作用メカニズムの理解に関して多くの進展があり、その結果、オゾン層の破壊による健康影響に関する予測の不確実性の程度が、減少しつつある。

・UV-B の眼への影響に関する研究により、UV-B 暴露と加齢に伴う皮質白内障との関連性が、より確かになった。最近の疫学研究により、皮質白内障の発生に対する紫外線の役割が確認され、いろいろな動物モデルを使った研究では、UV-B がこの症状の根本的な原因であることが強く示された。

・紫外線が引き起こす皮膚の黒色腫と基底細胞がん\*に関する、最近の動物モデルは、進展している。これらのモデルは、紫外線がどのように皮膚がんの発生を引き起こすか、もしくは寄与するかを決定するために使われる。興味深いことには、遺伝子導入マウスモデルを使った実験によれば、黒色腫誘発は、動物が幼い時に紫外線を照射された場合にのみ起こる。似たような結果がフクロネズミのモデルでも得られた。これらの発見は、幼年期の紫外線暴露が、後年での黒色腫の発生に対する重要な危険因子であるとする、疫学研究の結果を裏付ける。また両方のモデルにおいて、黒色腫の発生には、UV-B が UV-A より重要な役割を果たしているようである。

・皮膚がんの発生に影響する細胞中の特定の遺伝子と生化学的プロセスが発見された。\*\*そのような研究は、皮膚がんの発生に対する紫外線の関与についての理解を高め、最終的に、紫外線が原因で皮膚がんを患う危険性が最も高い人の特定を可能にするかもしれない。

・最近の研究結果は、皮膚がん発生の危険性のある種の介入により低下できることを示している。日焼け止めクリーム of 常用により、成人における有棘細胞がんの発生は減少した。また遺伝的に皮膚がんにかかりやすい人の皮膚に DNA 修復酵素を用いたところ、前がん病変が減少した。

・紫外光照射の免疫影響に関する研究は、紫外線が免疫機能を低下させるメカニズムに関する私たちの理解を高めている。しかしながら、アレルギー、自己免疫疾患、種痘、内臓器がんに対するこれらの影響の有意性については、たくさんの疑問が残る。

---

\* 基底細胞がんは sonic hedgehog(SHH)、patched(PCTh)と smoothened 遺伝子異常も発症に関与していることが明らかになっている。動物実験(patch gene の一方を欠損するマウス、ptcl<sup>+/+</sup>)ではマウス皮膚に UV により多数の基底細胞がんが生じた。黒色腫は UV-A と可視光で発症するとの動物実験報告と、ヒトでは UV-A を遮光すると逆に黒色腫が高発するとの疫学調査報告から、UV-A が黒色腫の作用波長と考えられていた。しかし、最近になり、UV-B が黒色腫の原因であるとの研究成果が報告された。

\*\* 紫外線による皮膚がん発症に最も深く関係しているのは、DNA 修復酵素をコードする遺伝子群（約 30 種）である。これらの遺伝子のポリモルフィズムが分析できると皮膚がんになりやすい人を推定できる。また、紫外線による免疫抑制に関与する遺伝子の発現や活性も同様に重要な因子である。さらに白人ではメラニン生成に関わる -MSH の受容体に変異があり、メラニン量が少ないため発がんしやすい。

・動物モデルによる感染症に関する研究結果は、UV-B 照射がさまざまな病気の発生、重症化、長期化を促進させるということへの有力な証拠を与える。これらの影響のうちいくつかは微妙で、人での感染症に関する疫学研究で検出するのは難しい。それでも太陽光暴露とワクチンの有効性の減少と感染症の悪化、特にヘルペス・ウイルス（口唇ヘルペスと帯状疱疹）によって発生する感染症との関連を示す証拠は蓄積され続けている。

・オゾン層破壊物質である臭化メチルの段階的廃止は、その他の農薬の使用とその種類の増加をもたらす可能性がある。これらの化学物質がよく規制されている場所では、さらなる健康への危険性は小さいはずである。しかしながら、その管理が厳格でない場所では、それらの物質の使用の増加がさらなる健康への危険性をもたらすことが懸念される。

・地球規模の気候変動とオゾン層破壊との相互作用は、UV-B 照射が健康に悪影響を及ぼすリスクに影響を与える可能性がある。この影響はプラスのものもマイナスのものもあり、したがって、健康への影響予測にさらなる不確実性を与える。例えば、気温の上昇は皮膚がんの発生を増加させる可能性もあるが、同時に、戸外での活動時間を減らすというような、人々の行動変化をもたらすかもしれない。地球規模の気候変動はまた、オゾン層破壊の期間を延ばすかもしれない、それは皮膚がんの発生をさらに増加させるかもしれない。気候変動により農薬使用エリアの地理的分布が変化すると、いくつかの地域ではそれが健康への悪影響をもたらす、他の地域では悪影響を減らすこともあるかもしれない。同様に、病原菌を宿す媒介生物の地理的分布の変化は、免疫機能の障害とあわせて、オゾン層破壊単独の場合に予想される影響よりもさらに大きい影響が感染症に与えられるかもしれない。

### 陸域生態系

・紫外光照射量と他の地球規模の気候変動要因とのあいだには、多くの生態系のプロセスに影響を与えるような相互作用があるかもしれない。例えば、植物生産、昆虫を含む草食動物による植物の摂食、動植物の病気の発生、種の優占度と構成などは、そのプロセスや特性が幾分変えられるかもしれない。これらや他の相互作用に関して研究するには、長期間の実験が必要である。

・メタ分析は個々の研究結果を集積して得られる定量的・統計的な情報を用いて、全体の研究が一般的な傾向や結果をうまく予測できるかどうかを評価するための手法である。メタ分析により、紫外線ランプシステムを用いて野外で実施された異なる植物種についての実験全体から一般的な傾向と結果をうまく予測できるかどうかを評価した。この分析結果では、生理学的・形態学的な性質のうち、草丈の低下、葉面積の減少、フェノール化合物の増加、そして時には生育量の減少と UV-B 照射量の増加全体との間に、高い統計的有意性が見られた。

・太陽光に曝された菌類と細菌類は、UV-B 照射量の増加により直接的に被害を受けることがある。植物に寄生する菌類と細菌類の種の構成と生物学的多様性は UV-B によって変化することがある。生物学的多様性は増加することも減少することもある。病原性に関しては、UV-B 照射量の増加は植物に発生した病害の程度を上昇させることも低下させることもある。

・植物が曝される UV-B 照射量が増加すると、病害や草食性の程度が変わることがある。UV-B 照射はしばしば昆虫の草食性の程度を低下させる。これはおそらくフェノール成分の変化のような植物組織の化学的変化が関与している。植物への病原菌の攻撃に対する UV-B 照

射の影響として、宿主植物の化学的变化による影響と病原菌への直接的な影響の両方の可能性がある。このように UV-B は、植物種によって病原菌の攻撃を促進もすれば抑制もする。

- ・ UV-B 照射量の増加に対する高等植物の一般的な反応は、二酸化炭素濃度の増加によって弱まるかもしれない。UV-B 照射量の増加によって植物の成長（草丈、葉面積、時には生産量）が減少した場合、二酸化炭素濃度の増加がこれらの減少をしばしば抑制することができる。

- ・ 水量の制限により、UV-B 照射量の増加に対して感受性が低下する植物があるかもしれない。乾燥ストレスに曝されている植物、特に農業用植物、では UV-B 照射量の増加に対する感受性が低下することが多い。地中海の低木林のような、ある種の環境で生育した植物は、増加した UV-B に暴露しても、乾燥ストレスに対して、より耐性がある可能性がある。

- ・ UV-B による植物の成長減少は、しばしば DNA 損傷の増大とともに起こる。UV-B 照射は、核酸、タンパク質、脂質のようないくつかの重要な生体高分子に影響を与える可能性がある。自然条件での UV-B 照射による成長阻害のメカニズムはまだあまり理解されていない。しかしながら、DNA 損傷と成長阻害との間に相関関係があることが報告されており、DNA の損傷が成長阻害に重要な役割を果たしていることが示唆される。

- ・ 気温上昇は、UV-B 照射による DNA の損傷の回復を促進するが、極端な気温上昇と UV-B 照射量の増加が組み合わさった場合は、予想外の結果を招く可能性がある。DNA の損傷は、低い気温に制限されなければ、効果的に回復する。ある環境のもとでは、気温上昇は DNA 損傷の回復を促進し、UV-B 照射が植物の成長に与える抑制効果を弱めるかもしれない。極端な気温上昇への反応のなかには、UV-B 照射量の増加によって予想外に変化するものもあるだろう。例えば、いくつかの亜寒帯のヒース類種の凍結への感受性が UV-B 照射によって大幅に上昇したという証拠がある。気候変動との関係でこの分野の一層の研究が必要である。

## 水域生態系

- ・ 最近の研究結果は、太陽紫外線が水生生物に悪影響を与えるという全体的なコンセンサスを引き続き確認している。生産性の減少、生殖と生長の障害、突然変異率の上昇が、紫外線に暴露した植物プランクトン、魚の卵、仔魚、動物性プランクトンとその第一次、第二次消費者で見られた。UV-B 照射に伴う生物資源の生産性の減少は、食物連鎖の全ての段階を通して伝達され、種の構成と生態系の健全性の変化に加えて、人類の食物生産量を減少させ、大気中の二酸化炭素のシンクの容量を減少させる可能性がある。

- ・ 生態系のレベルで、人為的な気候変動の評価と紫外線に関する影響は相互に関連があり、拮抗効果と相乗効果の両方の可能性がある。最近の研究結果は、これらの変化が生態系の回復力を失うことにつながることを示している。水域生態系では、春の植物性プランクトンの大繁殖と無脊椎動物と脊椎動物の産卵が、気候に関わるいくつかの要因の変化に加えて、急激なオゾン層の破壊と同時に起こることもある。

- ・ 極域の生態系は、変化に対して特に敏感である。なぜなら凍結と解氷の境界にあることから、以下のような環境に厳しい制限を課すためである。それは、気温と水温、時期、氷量と積雪の範囲と期間、地表のアルベドの変化、水柱の有色溶存有機物（CDOM）濃度の変化、太陽照射の度

合いとその通過の度合い、等を含む。そのような変化は、気候の変化によって促進される可能性があるが、オゾン層の破壊よりも、UV-B 暴露の度合いや UV-B と可視光の間のスペクトルバランスにとって重要である可能性がある。

・水柱の最上層を透過する太陽紫外線は、動物性プランクトンおよび第一次、第二次消費者の幼生期にも著しく影響する。太陽紫外線の影響は、雲量、水温の変化、藻と混合層の深度との相互の微妙な変化のような、他の環境要因によって大きく変化する。魚類及び甲殻類の数の減少の根本原因は、捕食関係、仔魚への少ない食物供給であるが、水温の上昇に伴う成魚の乱獲、水質汚染と病気、そして増加した UV-B の暴露がその減少に影響している可能性がある。両生類に関しては、卵が産まれる水深において気候変動が原因で減少が起こり、それは増加する太陽の UV-B への暴露とその後に起こる感染への脆弱性によって幼生の死亡率が高くなることによる。

・太陽紫外線の増加に加えて、水域生態系は、富栄養化、汚染、酸性化、地球規模の気候変動等の、他の環境ストレス要因にも直面している。例えば、気候変動は水温と海面の変化、解氷の時期及び範囲の変化、塩分濃度の変化、水柱の成層化、波の機構と海洋循環の変化をもたらす。これらの影響は、まだ完全には解明されていないが、はっきりとしたフィードバック・メカニズムと関連している可能性がある。結果として起こっている複雑な変化は、空間的、時間的に変化をする顕著な影響を与えることが多い。

### 生物地球化学的循環

・地球温暖化と UV-B 照射量の増加は、生物地球化学的プロセスに相互に影響を与える。陸上では、UV-B 照射量の増加が微生物の活動、栄養循環、土壌からの温室効果ガスの排出の進行を阻止もしくは促進させるのに対し、温暖化はこれらを拡大する。水圏でも、温暖化は微生物の活動を進行させる。生物の紫外線への暴露は、地球規模の気候変動と関連して、水の成層化の進行と表層水の混合の変化によって増幅する。

・UV-B 照射と海水温の上昇の相互作用は、海洋環境の放射の収支のバランスに影響を与える硫黄の移動量を左右する。海洋から大気への硫黄の排出量の増加は、海洋表層の混合の変化や、地球温暖化、UV-B 暴露の増加、UV-B による微生物の成長の抑制と関係している。海洋からの硫黄の排出は、雲の特性に影響を与え、ひいては海洋環境への海洋における太陽照射照射に影響を与える。

・紫外線は、陸上から海洋に流れ出る有色有機物の分解を促進することが新たに証明された。いままでは、陸上から発生した有機物は主に生物による酸化と堆積作用の高い沿岸水域への埋没によって消滅すると考えられていた。現在、紫外線がこの有機物の除去に中心的な役割を果たすことがわかった。

・陸上のシステムと大気の間での微量ガスの交換は UV-B 照射量の変化に影響される。陸域生態系の枯れた植物体から紫外線に起因して生成される一酸化炭素に関するさらなる調査で、これによる一酸化炭素の大気注入量は、年間の全球規模で大きいことがわかった。太陽紫外線に起因する窒素酸化物の生成はグリーンランド、南極大陸、カナダ、アメリカ合衆国北部といった多様な場所に位置する雪塊氷原にて観測されている。紫外線に起因する一酸化炭素と窒素酸化物の排出は対流圏オゾン濃度を局地的に変化させる可能性がある。

・陸上の窒素循環の重要な構成要素は、UV-B 照射の増加に対して敏感である。窒素が利用できないことで植物の成長が厳しく制限される北極地方において、浮遊生活のアオコによる窒素固定が増加した UV-B 照射量によって阻害された。亜北極帯の地衣類の中の共生藻による潜在的な窒素固定量もまた長期的に減少した。加えて、増加した UV-B 照射量は亜北極帯の土壤微生物により固定される窒素を増加させ、結果として植物の生長に利用できる窒素を少なくする。

・UV-B 照射の増加は陸上から海洋に流入する有色溶存有機物 (CDOM) の分解を促進させ、よって海洋の炭素循環のダイナミクスに大きな影響を与える。UV に起因する CDOM の可視光の吸収の変化は、海の色についてのリモートセンシングを基にした沿岸域の海洋生産性の予測の正確さに影響する。

・自然起源のオゾン破壊するハロゲン物質のいくつかの重要な発生源は、陸上生物圏で認められ、地球規模の収支の不足分を説明する。地球規模の大気中の臭化メチルと塩化メチルの収支の計算によると、大きなミッシングソースがある。最近の実験結果は、特に塩湿地などの陸上生態系からのこれらの気体の自然発生がミッシングソースの大きな部分を占めていることを示している。排出は日ごとの入射光線レベルに強く関連する活発なプロセスの結果のように見える。臭化メチルと塩化メチルはオゾンの減少のプロセスに加わっている。

## 大気質

・成層圏のオゾン減少が対流圏のオゾントレンドに与える影響は大きいですが、大気が汚染されている地域の人為起源の発生の影響に比べると小さい。モデルと実験による調査結果は、成層圏のオゾン減少が対流圏のオゾンに与える影響は、高度や化学的狀態が異なれば違いがあることを示している。濃度への測定可能な影響は、局地的な排出が大して影響を与えていない地域でのみ考えられる。窒素酸化物の鉛直分布には、揮発性の有機炭素の排出は、水蒸気量と同様に、重要な影響因子である。

・大気中の HCFC と HFC の分解によって生成されるトリフルオロ酢酸 (TFA) とクロロジフルオロ酢酸 (CDFA) の人類や環境に与える影響のリスクは最小限であると判断される。TFA は雨、河川、湖、そして最終的にこれらやその他関連する化学物質のシンクとなる海で観測される。HCFC と HFC の分解の他に、人類起源の TFA も認められている。

・オゾンの破壊と気候変動の相互作用は、対流圏の「浄化剤」である水酸基 (OH) ラジカル濃度に影響を与える可能性がある。成層圏のオゾン層の減少は対流圏の OH ラジカルの濃度を上昇させる。揮発性有機化合物等の気体の濃度上昇は、対流圏の OH のシンクの機能を果たす。エアロゾルもまたいくつかの状況で UV-B 照射量を減少させる機能を果たし、よって OH も減少する。雲量と気温の変化もまた影響を与える。これらは全て、気候変動に影響される可能性がある。対流圏の大気質と化学成分の正味の変化はこれらの影響の間のバランスに依存する。

・地球温暖化による大気のエアロゾル量の変化はオゾンの光解離率に影響し、よって対流圏のオゾン濃度を減少させるかもしれない。モデルと野外観測による研究結果では、対流圏の光吸収性エアロゾルの増加したところで、オゾンの光解離率の減少と対流圏のオゾンの生成が予想されることを示している。

## 材料

・気候変動は天然材料と人工合成材の紫外線に起因する劣化の速さを変化させる可能性がある。UV-B 照射量が多い地域では、気温の上昇は、光により劣化が誘発される物質の劣化の加速へ著しく影響を与える。これは特にビル建築で使われるプラスチックや木材に当てはまる。また湿度の上昇も、強い紫外線と一緒にになると、特に高い気温の時に、いくつかの物質に類似した影響を与える。

・改良された特性を持つ新種のプラスチック製品が現れ、これらはまた既存の光安定剤によって効果的に安定化される。最近の触媒の進歩がメタロセンプラスチック（ポリエチレンとポリプロピレン）の発見をもたらし、それは従来の種類と比べて紫外線への耐性がわずかによくなるなど、特性が向上した。一般に、使用されている従来の光安定剤は熱可塑性プラスチックの種類も安定化させるのに効果的であることがわかった。

・最近の調査結果は、光安定剤の効果の相乗的な向上は、従来の HALS 安定剤の混合物がプラスチックに使われた時に見られることを示す。高分子光安定剤（HALS）は通常、一般的なプラスチックの光安定剤として使われる。2つ以上の HALS の混合剤は、プラスチックの光安定剤としてよりよく機能すると最近報告されている。光安定剤の効果の向上は、紫外線と気候変動による影響に対するプラスチック配合物の安定化にかかるコストを最小化させるために重要である。