

# オゾン層破壊の科学アセスメント：2010

## Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010

### 総括要旨

### Executive Summary

#### 1. 概観

人類が放出してきた多くの化合物が成層圏オゾン層を破壊していることが、1970年代から認識されている。世界のオゾン層を保護しそれにより地球に到達する紫外線の増加から生命を保護するために、1987年にオゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書が採択された。モントリオール議定書による規制の対象である塩素や臭素を含む化合物は、オゾン層破壊物質として知られている。オゾン層破壊物質は、中緯度帯や極域で観測される成層圏オゾン層の破壊（例えば南極上空の「オゾンホール」）の原因である。南極域で成層圏オゾン層が大きく破壊されたことにより、地上に到達する紫外線が増加し、南半球の高緯度帯の気候に影響が及んでいる。

モントリオール議定書とその改正・調整の成果として、過去20年間にわたってオゾン層破壊物質の生産・消費が規制され、議定書作成当初から規制されてきた主要なオゾン層破壊物質のほとんどは大気中の量が減少しつつある。ただし、主なオゾン層破壊物質の中には放出されなくなっても大気中に長期間残留するものがあるため、オゾン層破壊はさらに数十年先まで続く見込みである。

オゾン層破壊物質の役割が減少しているのとは対照的に、気候変化が成層圏のオゾン量に与える影響が今後数十年で増大すると考えられる。これらの変化は主に、人間活動に伴って放出される二酸化炭素などの長寿命の温室効果ガスにより引き起こされる。今後科学的に解明すべき重要な課題は、オゾンと気候との間の複雑な相互作用を理解し、それに基づいて将来のオゾン量を予測することである。

ほとんどのオゾン層破壊物質は強力な温室効果ガスである。過去数十年間に濃度が増加したことが、地球温暖化の一因となってきた。モントリオール議定書の下で取られた対策によって、オゾン層破壊物質が増えていたら起こったであろう顕著な地球温暖化が抑制された。

成層圏オゾン層変化が地上の気候変化に及ぼす影響と、気候変化が成層圏オゾン層に及ぼす影響に関して、新しく確度の高い知見が、現在までに得られている。その知見は、ここで示した新しい「オゾン層破壊のアセスメント」の重要な部分である。

#### 2. 成層圏オゾンと気候に影響を及ぼす物質の変化

ある物質が大気全体に含まれる量の変化は、大気中への放出量と大気中からの除去量との収支バランスで決まる。モントリオール議定書の下で規制されているオゾン層破壊物質の濃度が減少したことは、放出量が世界的に削減されて除去量を下回った結果である。ほとんどのオゾン層破壊物質は強力な温室効

果ガスである。主要なオゾン層破壊物質の段階的廃止に伴い、代替物質である HCFC 類と HFC 類の需要が増えたが、これらもまた温室効果ガスである。HCFC 類は単位重量あたりのオゾン層破壊能力が CFC 類よりも小さく、HFC 類は非オゾン層破壊物質である。

### (1) オゾン層破壊物質と代替物質：対流圏の濃度と放出量

- ・ モントリオール議定書とその改正・調整の成果により、ほとんどの規制対象オゾン層破壊物質の放出量（図 ES-1）と下層大気（対流圏）での存在量のほか、それらを起源とする全塩素量と全臭素量も減少し続けている。オゾン層破壊物質と塩化メチルから放出された対流圏中の全塩素量は、ピーク時の 3.7ppb から 2008 年までに 3.4ppb に減少したが、減少率は想定 の 3 分の 2 程度でしかなかった。これは、CFC 類の減少が想定より遅いのに加え、HCFC 類の濃度が想定より早く増加しているためである。CFC 類の減少が遅れたのは、冷蔵庫・エアコン・発泡材のような現在使用中の「貯蔵物」から放出されたためと思われる。HCFC 類の急速な増加は、特に東アジアの発展著しい諸国における生産量の増加と同時に起きている。規制対象オゾン層破壊物質を起源とする対流圏中の全臭素量の減少率は想定と近いが、これは臭化メチルの減少によってもたらされたものである。
- ・ 過去数年間に全塩素量が減少した最大の原因は CFC 類の減少であり、これは 21 世紀中続く見込みである。観測によると CFC-12 の対流圏中の濃度は、初めて減少に転じた。メチルクロロホルム ( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ) 濃度の減少による全塩素量の減少は、過去のアセスメントより小さく評価した。その寿命が短いため既に大半が大気中から除去されているためである。
- ・ 四塩化炭素 ( $\text{CCl}_4$ ) の濃度減少は、想定よりも遅かった。UNEP に報告されたデータから見積もった  $\text{CCl}_4$  の放出量は変動が非常に大きく、平均的には観測された濃度変化傾向から推定した放出量よりも小さかった。この違いは、 $\text{CCl}_4$  の大気中の残留時間(寿命)に関する知見が不確実なことから生じているが、寿命の不確実性では  $\text{CCl}_4$  の放出量の変動を説明することはできない。年ごとに放出量の推定値の差が異なる原因として、報告値そのものの誤差やデータ解析時に生じた誤差、知られていない放出源などが考えられる。
- ・ 熱帯の対流圏界面付近で行った観測によると、塩化メチレン ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )、クロロホルム ( $\text{CHCl}_3$ )、1,2 ジクロロエタン ( $\text{CH}_2\text{ClCH}_2\text{Cl}$ )、パークロロエチレン ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ) など、モントリオール議定書で現在規制されていない幾つかの非常に短い寿命の工業的塩化物質が、成層圏に到達していることがわかった。しかしながら、これが成層圏塩素量の増加をどの程度もたらすかは、よくわかっていない。
- ・ ハロン類を起源とする臭素の量は、2005～2008 年の間に対流圏では増加しなくなった。予測されていたとおり、ハロン-1211 の濃度は 2005～2008 年の間に初めて減少に転じた。一方、ハロン-1301 は前回のアセスメントで予測したよりも緩やかに増加し続けている。
- ・ 対流圏の臭化メチルの濃度は、工業生産量、消費量、放出量ともに削減されたことにより、2005～2008 年の間予想どおり減り続けた。いまなお続いている臭化メチル消費の約半分は、モントリオール議定書で規制されない用途(検疫と出荷前処理)のためのものである。
- ・ HCFC 類の中には、対流圏の濃度および放出量が 4 年前よりも速く増加しているものがある。そのうち最も濃度の高い HCFC-22 の量は、2007～2008 年には 2003～2004 年より 50%速く増加

した。また、HCFC-142b の濃度は、2003～2004 年の約 2 倍の速さで増加した。HCFC-141b の濃度は、2003～2004 年と同様の増加率で増えた。HCFC 類の放出量は、モントリオール議定書の下で既に合意されている規制の効果によって、今後 10 年程度で減少し始めると予測される(図 ES-1)。

- ・ HFC 類は、主に CFC 類と HCFC 類の代替物質として使われており、対流圏の濃度と放出量ともに増加し続けている。例えば、HFC 類の中で最も多く存在する HFC-134a の濃度は、最近毎年約 10% ずつ増加している。HFC-125、HFC-143a、HFC-32、HFC-152a など他の HFC 類の濃度も増加している。地域別に推計した研究によれば、ヨーロッパ、アジア、北米から多量に放出されているようである。

## (2) CFC 類、HCFC 類、HFC 類と気候変化

- ・ モントリオール議定書とその改正・調整は、温室効果ガスの放出量を減少させる意味でも大いに貢献してきた(図 ES-1)。2010 年現在、モントリオール議定書の下でのオゾン層破壊物質の放出削減量は、1 年あたり約 100 億トンの二酸化炭素の放出抑制に相当すると推定されている<sup>(1)</sup>。これは、京都議定書の第一約束期間(2008～2012 年)における年間温室効果ガス削減量目標値の約 5 倍である。
- ・ オゾン層破壊物質の代替物質として現在使われている HFC 類の放出量は、二酸化炭素換算で年あたり合計約 4 億トンであり、HCFC 類は約 7 億トンである。また、二酸化炭素に換算した HFC 類の放出量は年あたり 8% の割合で増加しており、今後さらに加速すると予測されている。一方、HCFC 類については今後 10 年で減少し始めると予測されている。
- ・ HCFC-22 の副産物である HFC-23 の放出量は、2006～2008 年の間に二酸化炭素換算で年あたり約 2 億トンであった。HFC-23 は、約 220 年の寿命をもつ特に強力な温室効果ガスである。京都議定書のクリーン開発メカニズムによるものを含め世界的に削減対策が進められているにもかかわらず、過去 10 年で放出量が増加している。

## (3) 全塩素量および全臭素量、ならびにオゾン層破壊への影響

- ・ 全塩素量は、対流圏、成層圏ともに 1990 年代にピークとなった後は減り続けている。全臭素量は、対流圏で比較的最近ピークとなった後に減少しており、成層圏では既に増加は止まっている。
- ・ 成層圏の塩素と臭素の合計量でみて、ピーク時と比べた減少量が最大なのは中緯度、最小なのは南極域であった。ただし成層圏での減少は、対流圏ほど明瞭ではない。成層圏での減少に地域差があるのは主に、空気が対流圏からその領域まで移動するのに要する時間が異なるからである。南極域でピーク時からの減少量が最小だったのは、第一に移動時間が最大であることによる。

---

注(1):ここでいう二酸化炭素換算の放出量は、対象とする物質の放出量に 100 年間の地球温暖化係数を乗じたものと定義する。(訳注:本報告における二酸化炭素量は、すべて炭素換算量ではなく、二酸化炭素換算量で表しています。)

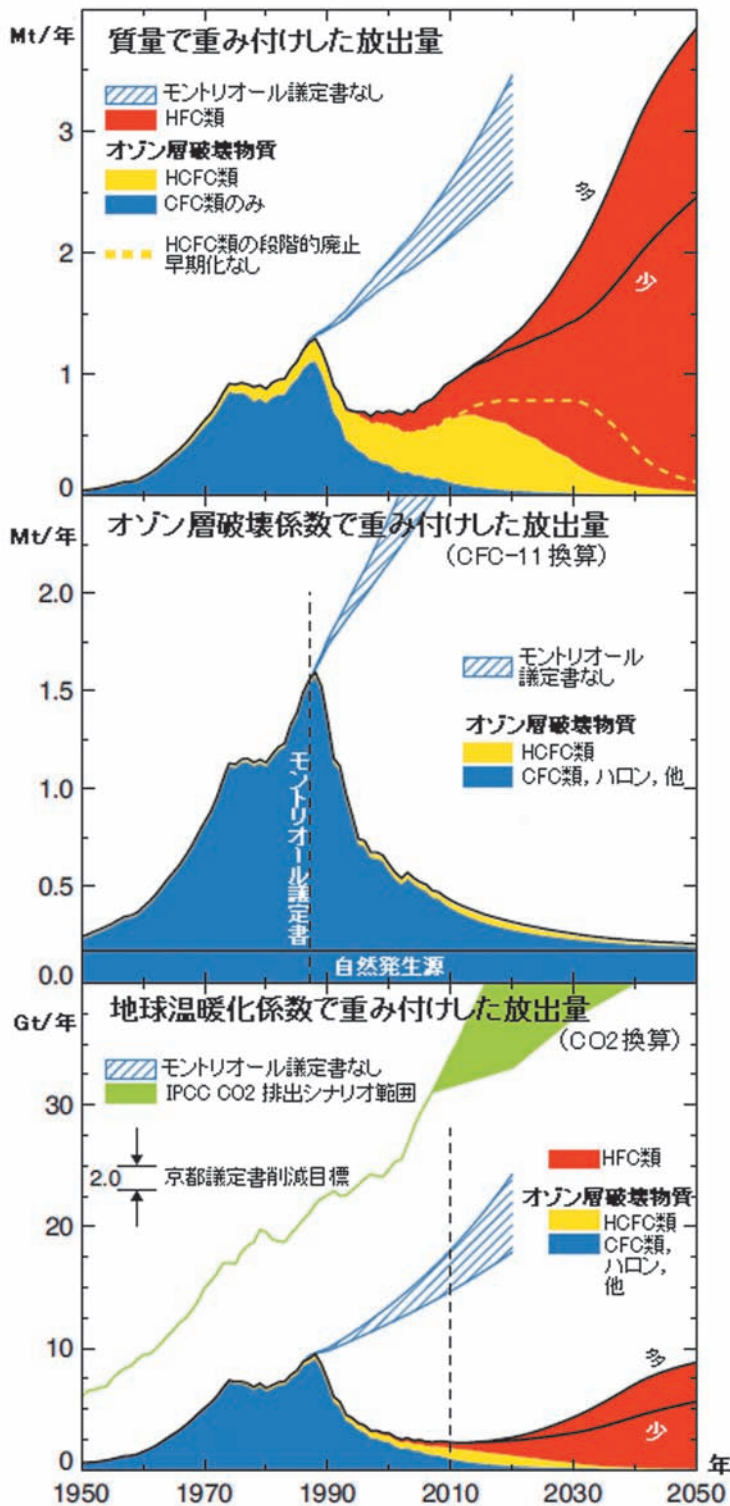


図 ES-1. オゾン層破壊物質と代替物質の放出

量は、世界の化石燃料使用量とセメント生産量から求めた。2007 年以降に二酸化炭素放出量が面的に広がっている部分は、SRES シナリオのうち最大 (A1B) と最小 (B2) のものを表す。縦の破線は、京都議定書の第一約束期間の中間年である 2010 年を示す。京都議定書の第一約束期間の削減目標の大きさも示した。これは、1990 年から 2010 年に予測される世界の温室効果ガス放出増加量と締約国の削減目標に基づいている。

オゾン層破壊物質 (CFC 類、ハロン類、HCFC 類、その他) とその代替物質でオゾン層を破壊しないもの (HFC 類) の 1950 年から 2050 年の世界合計放出量。放出量は、先進国分と開発途上国分を合わせた量である。各図の凡例に示したとおりに物質をグループ分けした。HFC 類の「多」「少」の表示は、それぞれ基本シナリオの中の上下限を示す。青のハッチがけした部分は、モントリオール議定書がなく全オゾン層破壊物質の生産量が毎年 2~3% 増加すると仮定した場合の放出量を表している。

上段：質量で重み付けして合計した世界の放出量 (100 万トン/年で表す)。黄色の破線は、モントリオール議定書の 2007 年改訂による HCFC 類の段階的廃止の前倒しが実施されないとして計算した HCFC 類の放出量を示す。

中段：オゾン層破壊係数で重み付けして合計した世界の放出量 (CFC-11 換算の 100 万トン/年で表す)。各物質の放出量にそれぞれのオゾン層破壊係数 (CFC-11 を 1 とする) を乗じて、CFC-11 相当の放出量を求めた。縦の破線はモントリオール議定書が採択された 1987 年を示す。

下段：地球温暖化係数で重み付けして合計した世界の放出量 (二酸化炭素換算の 10 億トン/年で表す)。各物質の放出量にそれぞれの地球温暖化係数 (直接効果のみ、評価期間 100 年で、二酸化炭素を 1 とする) を乗じて、二酸化炭素相当の放出量を求めた。参照のため、IPCC の排出シナリオに関する特別報告書 (SRES) による二酸化炭素放出シナリオの幅を示した。1950~2007 年の二酸化炭素放出量は、世界の化石燃料使用量とセメント生産量から求めた。

### 3. 南極域のオゾンと気候

南極オゾンホールは、オゾン層破壊物質がオゾン層に及ぼす効果が最も明瞭に現れたものである。オゾン破壊の結果、自然変動の幅を大きく超えたオゾン全量の減少が、1980年以降例外なく毎年発生している。オゾンホールはまた、オゾン層破壊が地上の気候にどのように影響を与えるかを最も明瞭に示す例となっている。

- ・ 南極の春季にオゾン全量が減少する現象（オゾンホール）は、1980年頃に最初に認識できるようになり、その後毎年発生している（図 ES-2c）。オゾンの減少量は主に気象の変動に起因して年々変動するが、極渦内の10月の平均オゾン全量は過去15年間の平均で1980年より約40%少なくなった。1991～2006年に南極点で観測された紅斑紫外線（日焼けをもたらす紫外線）の平均値は、1963～1980年の推定値に比べ55～85%多かった。
- ・ 前回のアセスメント以降に南極オゾンホールの原因についての理解に誤りがあるのではないかという疑問が提起されたが、現在までに解決されている。極域のオゾン層破壊で鍵となる化学反応に関して新しく室内実験測定が行われ、その結果、オゾン層破壊物質がオゾンホールの原因に間違いがないことが再確認された。オゾンホールに関与する化学物質の量を野外観測から見積もった結果からも、その結論が支持されている。
- ・ 南極オゾンホールが南半球の地上の気候に影響を与えていることを示す証拠が増えている。気候モデルを用いたシミュレーションにより、オゾンホールが南半球の中高緯度帯で夏季に観測される地上風の変化を引き起こす主要因であることが示された。地上風の変化が、南極半島の温暖化と南極高原の寒冷化の一因になった。その変化はまた、降水の地域的变化、南極周辺の海氷の増加、南極海の温暖化および二酸化炭素の海洋吸収の局地的な減少とも関連している。
- ・ 南半球の夏季の地上風の変化傾向は、今後数十年も続かないと予測される。温室効果ガスの増加とオゾンホールの回復によって、地上風に及ぼす影響が相殺されると予測されるためである。
- ・ 観測によると、南極の春季のオゾン全量は、まだ統計的に有意な増加傾向を示していない（図 ES-2c）。現在のところ、極渦の中でオゾン層破壊物質がわずかに減少したことによる変化量よりも、気象に起因して生じる年々変動の方が大きい。これは、化学気候モデルを使ったシミュレーション結果とも一致している。
- ・ 南極の春季のオゾン全量は、21世紀中にはオゾン層破壊物質量の減少が主要因になって推移すると予測される（図 ES-2c）。化学気候モデルを用いたシミュレーションによれば、温室効果ガスの変化がオゾンホールに及ぼす効果は、過去においてオゾン層破壊物質の効果よりも小さかったこと、そして将来もその状況は変わらないことが示されている。今世紀末においてさえも、小規模で一時的な南極オゾンホールが起こる可能性がある、という見解もある。南極域では、春と初夏に地上紫外線が非常に強くなるという状況が続くことになる。

#### 4. 世界と北極域のオゾンと気候

モントリオール議定書とその改正・調整による規制の結果、オゾン層破壊物質が減少し成層圏オゾンの回復につながると予測されている。しかし、今後数年間のオゾンの増加がオゾン層破壊物質の減少の結果であると結論付けることはとても難しい。自然の変動や観測の不確実性のほかにも、成層圏の気温や水蒸気の変化のように切り分けることが困難な要因があるためである。このアセスメントの特色は、複数の化学気候モデルを運用するグループの協力により、統一的な条件の下で 1960～2100 年の期間を対象とした数値計算を行い、その結果を用いて成層圏の長期変化や、オゾン層破壊物質と温室効果ガスのそれぞれの寄与の割合についての詳細な研究が可能となったことである。

- 2006～2009 年の平均オゾン全量は、前回アセスメントと同じレベルで、1964～1980 年平均と比べて南緯 90～北緯 90 度の平均で約 3.5%、南緯 60～北緯 60 度の平均で約 2.5%少なかった。2006～2009 年の中緯度(35～60 度)の平均オゾン全量は、1996～2005 年と同じレベルであり、1964～1980 年の平均よりも南半球で約 6%、北半球で約 3.5%小さかった。
- 2007～2010 年の間の北極域における冬季と春季のオゾン減少には年々変動がみられるが、1990 年代初め以降にみられた変動の範囲内に留まっている。北極で寒さが厳しい冬季には、以前と同様に化学過程によってオゾンが大きく減少している。
- 北極域の成層圏オゾン層破壊と対流圏および地上の気候変化との関連は、まだ明瞭なものが、みられないが、オゾン層破壊量が南極域と比べて小さいことから予想されていたことである。
- オゾン層破壊物質が増加していた頃に観測された両半球中緯度帯のオゾン変化傾向とその、緯度方向、鉛直方向の構造が、ともに化学気候モデルで再現された。これにより、オゾン変化に関するこれまでの基本的な理解は間違っていなかったことが確かめられた。モデルによるシミュレーションの結果は、最近 10 年間に世界のオゾン全量の変化が小さくなっているという観測事実と一致している。
- 地上および衛星の観測データを用いた解析の結果、中緯度帯の紅斑紫外線量は 1970 年代後半以降増加していることが示された(図 ES-2e)。ほかの要因(主に雲とエアロゾル)が紅斑紫外線の長期変化に影響を与えることを考慮する必要はあるものの、この結果はオゾン全量観測値が減少していることと定性的に一致している。中緯度帯の大気汚染のない地点における晴天時の紫外線観測によれば、1990 年代後半以降の紫外線強度はほぼ一定であり、この期間のオゾン全量観測結果と整合している。
- 衛星およびラジオゾンデの観測データを用いた新しい解析結果から、1980～2009 年の成層圏気温の変化に関して信頼性の高い結論が得られた。1980～1995 年の間の世界平均気温は、下部成層圏で 1～2℃、上部成層圏で 4～6℃それぞれ低下した。概ね 1995 年以降の世界平均の成層圏気温には、有意な長期変化傾向はみられない。下部成層圏の寒冷化は直線的ではなく、1980 年代初期と 1990 年代初期に段階的に温度が低下している。下部成層圏の寒冷化は、以前は中高緯度帯に限られると考えられていたが、熱帯でも起こっていることがわかった。
- 下部成層圏の気温の時間変化には、自然要因と人為的要因の両者の変化が複合的に影響する。1980 年以降の下部成層圏の寒冷化は、オゾン減少の影響を受けている。大規模な火山噴火と太陽活動は、明瞭でより短期的な効果をもつ。これらの要因をすべて考慮したモデルにより、この気温の

変化経過を再現することができる。

- ・ 成層圏のオゾン、水蒸気、エアロゾルの変化はすべて、放射過程を通じて地上気温に影響を与える。成層圏オゾン層破壊による 2008 年の気候放射強制力<sup>(2)</sup> ( $-0.05 \pm 0.1 \text{ W/m}^2$ ) は、その破壊の大きな原因である CFC 類と HCFC 類がもつ正の放射強制力 (およそ  $+0.3 \text{ W/m}^2$ ) よりも絶対値がかなり小さい。なお、二酸化炭素の現在の放射強制力は約  $+1.7 \text{ W/m}^2$  である。放射計算と気候モデルを用いた研究によれば、成層圏の水蒸気変化が放射に与える効果 (10 年あたり  $\pm 0.1 \text{ W/m}^2$  程度) は、世界平均した地上気温の 10 年スケールの変化に寄与し得るとみられている。気候モデルと観測事実から、大規模な火山噴火 (例えば 1991 年のピナトゥボ火山ではおよそ  $-3 \text{ W/m}^2$  の効果) の後、数年間にわたって地上の寒冷化が起こり得ることがわかっている。
- ・ 中部および上部成層圏では、主に二酸化炭素の増加によって今後 100 年程度は寒冷化が続くと予測される。成層圏オゾンの回復により、この寒冷化がわずかに緩和される。HFC 類の濃度が成層圏で 1ppb レベルに達した場合、熱帯の下部成層圏と圏界面付近の気温が約  $0.3^\circ\text{C}$  高くなる可能性がある。
- ・ 最近のモデルシミュレーションから新たにわかったことに、温室効果ガスの増加によりブリューワー・ドブソン循環として知られる成層圏循環が強まるという予測がある。このような循環強化が起こると、オゾン全量が熱帯で減少しそのほかの緯度帯で増加するといった非常に重要な結果をもたらす。しかし、循環強化を引き起こすメカニズムはまだ解明されておらず、循環が強まっているという観測事実もまだない。
- ・ 世界全体のオゾン量は、オゾン層破壊物質の減少にほぼ同調して回復すると予測されているが、上部成層圏の寒冷化によりさらに加速される。世界全体のオゾン量は、成層圏循環の変化には大きく影響されないため、この予測には高い信頼性がある。
- ・ 北極域のオゾン量の増加は、南極域に比べ、気候変化の影響を受けやすいと予測される。予測どおり成層圏のブリューワー・ドブソン循環が強化されれば、北極域の下部成層圏のオゾン量をかなり増加させるとみられ、上部成層圏の寒冷化による温室効果ガス起源のオゾン量増加を促進し、1980 年レベルへの回復を早めることが予測される。
- ・ 温室効果ガスが引き起こす気温と循環の変化により、中緯度のオゾン全量の 1980 年レベルへの回復が数十年早まり、今世紀末までには 1980 年レベルを十分に上回ると予測される。その効果は、北半球中緯度帯で最も顕著であり (図 ES-2d)、晴天時の地上紫外線の強度は今世紀半ばまでには 1980 年レベルを十分に下回る可能性がある (図 ES-2e)。南半球の中緯度帯では、循環変化の効果が比較的弱いことが予想されるうえに、オゾン量が 1980 年レベルに回復するのがもっと遅い南極の影響も受ける。

---

注(2): 一般に正の放射強制力は地表面を暖め、負の強制力は地表面を冷やす。

赤線は現在までの観測値を、青破線は一般に認められている将来シナリオを示す。影を付けた部分は、過去と将来のシミュレーションにおける年々変動と不確実性を示す。1980年の縦破線は、オゾンと紫外線の回復を判断する基準とされる年を示し、オゾン層に重大な変化があった前後を分けるものである。地球の気候に大きな影響を及ぼす二酸化炭素の曲線も示した。その変化が成層圏気温や風の分布に影響し、その両方が成層圏オゾンに影響するからである。

(a) 大気下層(対流圏)における塩素と臭素のオゾン層の破壊効率を考慮した総量。赤線は観測で得られた大気中の量を、青破線はこの報告書で使われた最も実現性の高いオゾン層破壊物質の放出シナリオと大気の作用に関する最新の知見に基づいた予測を示す。モントリオール議定書の効果により、今世紀末にかけて減少が続き、1980年レベルに戻るのは今世紀半ばと予測されている。成層圏では、物質が地表から成層圏に輸送されるのに時間がかかることから、同様の曲線ながらも数年分右側(時間が遅い方向)にシフトする。

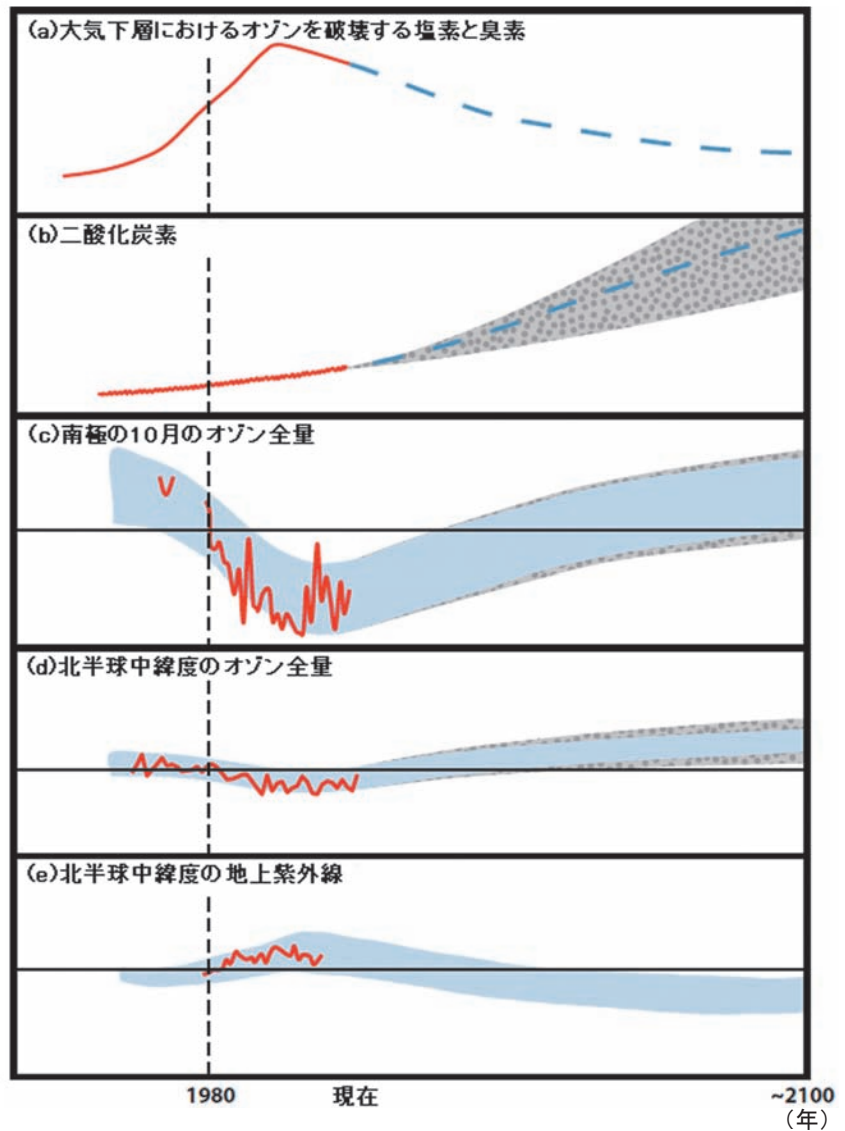


図 ES-2. オゾン層破壊物質と気候変化が成層圏オゾン層に及ぼす影響とオゾンの変化が地上で受ける紫外線に及ぼす影響の概念図

(b) 二酸化炭素の大気中濃度。二酸化炭素は、成層圏を含む地球の気候を変える人為起源の主な温室効果ガスであり、濃度の変化は気候変化を間接的に表すものである。灰色のドット模様をつけた陰影部分は、この報告書中で使われた複数の異なるシナリオによる二酸化炭素量の予測値の幅を表す。

(c) 10月平均オゾン全量でみた南極オゾンホール大きさ。オゾンホールはオゾン層破壊物質によるオゾン層破壊を最も明瞭に表すものであり、大気中のオゾン層破壊物質は将来にわたってオゾンホール大きさや期間を決定づける主要因であり続けると考えられている。南極のオゾン量は、21世紀末には1980年以前の値に戻ると予測されている。青い影を付けた部分はオゾンの年々変動の幅を示す。変化を求めるのに、オゾン層破壊物質の変化(パネル a)、二酸化炭素(パネル b の青破線)、一酸化二窒素とメタンの変化(図には示さない)を考慮したシナリオを使った。ただし、全ての不確実性を網羅しているわけではない。灰色のドット模様をつけた陰影部分は、気候シナリオの違いによる不確実性を表すが、これも全てを網羅しているわけではない。

(d) 北緯30~60度間の平均のオゾン全量からみた北半球中緯度のオゾン層破壊の大きさ。青と灰色の部分の説明は、パネル c と同様である。パネル c と d は、北半球中緯度のオゾン層破壊と南極オゾンホールの相対的な規模を表す。準 2

年周期振動(QBO)、火山噴火、太陽活動の影響は観測データから除いてある。将来予測には、火山噴火や太陽活動の変動の影響は考慮していない。北半球中緯度でオゾン層が1980年以前のレベルに戻るのがいつになるのかを判断するのは自然変動があるために難しいが、気候変化のためにこの回復時期が数十年早まり、21世紀半ばより前になる(成層圏の塩素と臭素の量が1980年レベルに戻るより前であり、パネルcに示した南極オゾンが回復する時期よりも早い)と予測されている。

(e) 上に示すオゾン層破壊物質シナリオでのオゾン変化に伴う、北半球中緯度で晴天時の地上紫外線の変化。北半球中緯度では、オゾン層破壊が小さかったことから紫外線の変化も小さい。青い影の部分は、パネルdのオゾン変化に対応する地上紫外線の年々変動の幅を示す。地上紫外線は雲、エアロゾル、大気汚染の影響も強く受けるが、それらの将来変化を予測するのは困難である。これらの要素の変化に伴う不確実性は、オゾン変化による不確実性よりも大きい、図には示していない。北半球中緯度の晴天時の地上紫外線は、気候変化の結果、今世紀の半ばまでに1980年レベルを十分に下回ると予測される。

## 5. 政策決定者向けの情報と政策策定のための選択肢

様々なオゾン層破壊物質の放出量、生産量および貯蔵量の削減について、基本となる将来の放出シナリオから派生させる形で、いくつかのケースを考えることができる。ここでいう基本シナリオはオゾン層破壊物質の放出量の将来予測に加えて、過去から現在の濃度を再現するように作成されたものである。基本シナリオに基づく予測によると、成層圏の塩素と臭素の濃度が1980年レベルに戻るのを、中緯度帯では今世紀半ば、南極の極渦内ではそれより約25年遅れるとしている。基本シナリオに追加されたケースは、様々な政策選択肢を実行した場合の効果を評価するのに使われる。

### (1) 政策決定者向けの情報

- ・ モントリオール議定書は、オゾン層を保護すると同時に、気候変化の緩和という大きな副次効果をもたらした(図 ES-1 の中段・下段参照)。オゾン層破壊物質の生産と消費が段階的に廃止され、成層圏オゾン層が保護されてきた。もしオゾン層破壊物質の放出が規制されずに増加し続けていたら、今後数十年間に、これまで観測されたよりもはるかに大規模なオゾン層破壊が起こり、地上に到達する紫外線も大きく増えたであろうということを、モデルを用いたシミュレーション結果は示している。
- ・ HFC 類の規制が行われないと仮定したシナリオによれば、地球温暖化係数を考慮した放出量は、2050年までに1988年のピーク時のCFC類に匹敵するようになると予測される(図 ES-1 の下段参照)。図中で予測の上限は、現在使われているのと同じくらいのHFC類を開発途上国が使うようになると仮定したケースを示したものである。
- ・ 2007年にモントリオール議定書の締約国が合意したとおりにHCFC類の段階的廃止が前倒しされると、オゾン層破壊の緩和と気候強制力の減少が促進されると予測される(図 ES-1を参照)。すなわち、オゾン層破壊係数を考慮した排出量に換算すると、2011~2050年の累積で約70万トン相当のHCFC類の排出が削減され、等価実効成層圏塩素(EESC)が1980年レベルに回復するのが4~5年早まることになる。また、二酸化炭素に換算すると、2011~2050年の平均で年あたり約5億トン相当の温室効果ガスの放出が削減されることになる。それがどれだけの利益をもたらすかは、HCFC類の代替物質が気候にどれだけ影響を及ぼすかによる。なお、人為起源の二酸化炭素放出量は、2008年現在、全世界で年あたり300億トンを超える。

- ・ 前回のアセスメント以降、新たなフルオロカーボン類が、強力な温室効果ガスである HCFC 類と HFC 類の代替物質の候補として、作られている。例えば、HFC-1234yf(オゾン層破壊係数は 0、評価期間 100 年の地球温暖化係数は 4)が、カーエアコンに使う HFC-134a(オゾン層破壊係数は 0、評価期間 100 年の地球温暖化係数は 1370)の代替物質として開発されている。開発された新たな物質の一つ一つについて、そのオゾン層破壊係数、地球温暖化係数、大気中の寿命、安全性および毒性の大きさを決定し、環境への影響をあらゆる面から評価する必要がある。予備的な試験結果によれば、現在使用されている量の HFC-134a が HFC-1234yf に置換された場合でも、対流圏オゾンの生成に大きく寄与したり、分解生成する TFA(トリフルオロ酢酸)が有害になる量まで発生することはないと予測されている。TFA は、環境中にどこにでもある化合物であることはよく知られているが、その自然起源および人為起源の発生量や大気中での寿命と量には、まだ大きな不確実性がある。

モントリオール議定書とその改正・調整によって規制対象のオゾン層破壊物質の生産・放出量と大気中の量を減らす効果が上がったが、その分だけ、モントリオール議定書で規制されていない化合物や用途が成層圏オゾンに及ぼす影響が相対的に大きくなった。

- ・ 二酸化炭素やメタンのような放射への影響が大きい物質の量が増加すると、気温・風・化学過程に影響がおよび、その結果将来の成層圏オゾン量に大きく影響すると予測されている。大気中の二酸化炭素は 2005～2008 年に年間 2.1ppm の割合で増加し、メタンは 2006～2008 年に年間 6.7ppb の割合で増加した。
- ・ 一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) は、オゾンを破壊する物質であるとともに気候を温暖化する効果をもつ物質としても知られている。オゾン層破壊係数で重み付けした場合、その人為起源の放出量は、現在、全てのオゾン層破壊物質の中で最大である。
- ・ 気候を調節する手法（ジオエンジニアリング）の一つとして、硫黄を含む化合物を大量に成層圏へ放出させる技術が提案されているが、この手法を用いた場合に成層圏の放射的・力学的・化学的な状態が変化し、成層圏オゾン量に意図しない重大な影響が生じる可能性がある。

## (2) 政策策定のための選択肢

様々な物質をさらに規制した場合にどのような効果が表れるのかを示すため、複数の追加的なシナリオが作成された。下に示す表 ES-1 では、それぞれのシナリオを仮定した場合に達成できる塩素と臭素を合わせた存在量および二酸化炭素換算した放出量の、基本シナリオからの削減量を示している。

- ・ ハロン類と CFC 類：  
オゾン層破壊係数で重みづけした場合、オゾン層破壊物質の放出量の中で、貯蔵物からの漏出が現在最も多くを占めている。CFC 類の貯蔵分の回収と破壊が 2011 年から 2015 年に遅れると、オゾンと気候に対する好ましい効果が約 30%減ると推定されている。
- ・ 四塩化炭素 (CCl<sub>4</sub>)：  
2010 年以降の CCl<sub>4</sub>の放出が全廃されれば、それが EESC に与える効果は、CFC 類とハロン類の貯蔵分を回収・破壊するのと同等になる。放出量の推定値を見直したため、この効果は、前回のアセスメントに比べ、かなり大きくなっている。

- HCFC 類 :**  
 開発途上国における HCFC 類の最近の生産量は、報告量で見ると前回のアセスメントで予測したよりも大きく増加している。そのことだけを考慮した場合には、新しい基本シナリオでの HCFC 類生産量は前回アセスメントより大きくなりそうだが、ここでは 2007 年にモントリオール議定書締結国が合意した HCFC 類の段階的廃止の前倒しによる削減効果の方が大きくなると想定されている。
- 塩素と臭素を含むオゾン層破壊物質の 2010 年以降の全廃 :**  
 この化合物を全廃することにより、EESC が 1980 年レベルに回復する時期が約 13 年早まるとともに、気候への影響に関しては、2011～2050 年に二酸化炭素換算で年あたり平均約 7 億トン削減するのと同等になる。このような二酸化炭素換算で求めた温暖化への効果は、CFC 類および HCFC 類の現在の貯蔵分によるものと、将来生産される HCFC 類によるものとが同じくらいになる。
- 臭化メチル :** 次の 2 つの事例について試算した。  
 事例 1: 検疫と出荷前処理での使用が 2011 年から段階的に廃止されることにより、2004～2008 年の平均使用量のまま維持されるのと比べて EESC が 1980 年レベルに回復する時期が 1.5 年早まる。  
 事例 2: 規制から除外された特定用途での使用量が 2011 年に認められた量のまま無期限に継続すると、EESC の回復時期が 0.2 年遅れる。

表 ES-1. シナリオごとの試算

塩素と臭素を合わせた存在量 (EESC 相当) と地球温暖化係数で二酸化炭素に換算した放出量の削減分を、それぞれ基本シナリオを基準として算出し、様々な物質をさらに規制した場合にどれくらい効果があるかを示した。

物質名 (単独又はグループ)	EESC 相当量の 削減率 (%)		地球温暖化係数で 二酸化炭素に換算して計算した 2011～2050 年合計の 削減量 (単位: 10 億トン)	
	2011 年	2015 年	2011 年	2015 年
<b>2011 年と 2015 年に 貯蔵分を回収して破壊:</b>				
CFC 類	11	7.0	7.9	5.5
ハロン類	14	9.1	0.4	0.3
HCFC 類	4.8	5.3 <sup>(1)</sup>	4.9	5.5 <sup>(1)</sup>
<b>2010 年以降に生産全廃:</b>				
HCFC 類		8.8		13.2
臭化メチル (検疫と出荷前処理用)		6.7		0.002
<b>2010 年以降に放出全廃:</b>				
CCl <sub>4</sub> <sup>(2)</sup>		7.6		0.9
CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>		0.1		0.004
HFC 類		0.0		最大 170 <sup>(3)</sup>

注 (1): HCFC 類の貯蔵分を回収して破壊する量は 2015 年の方が 2011 年よりも大きいですが、この試算では対象年 1 年のみの破壊量に基づくこと、また、毎年の生産量が引き続き破壊量を上回るため 2015 年の貯蔵量は 2011 年の貯蔵量よりも多いことが理由である。

注 (2): 貯蔵量はゼロと仮定している。放出量には、一時的に漏出したり、副産物として意図せず放出されるといった見積りの不確実なものも含む。

注 (3): 将来の予測放出量に強く依存する。また、HFC-23 は考慮されていない。現在 HFC 類はモントリオール議定書では規制されていないが、京都議定書では規制対象に含まれている。