

オゾン層破壊の科学アセスメント：2006 Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006

総括要旨 Executive Summary

1987年に採択されたオゾン層破壊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、世界の専門家から成るパネルによって評価された最新の科学・環境・技術・経済面の情報に基づいて、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、科学的理解の進展状況がこれまで1989、1991、1994、1998、2002年に科学評価パネルによって評価されてきた。この情報は締約国間の議論を助け、同上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2006年版科学アセスメントは、このシリーズの6番目のものである。この総括要旨の中の情報は、同アセスメントの8つの詳細な章に基づいている。

前回のアセスメントでは、地表面での放出が成層圏に届くまでに要する時間による遅れがあることを示しつつ、対流圏のほとんどのオゾン層破壊物質の量は、成層圏の塩素量も同様であるが、モントリオール議定書のもとで取られた対策によって、安定または減少している兆候が示された（概略図1 a, b 参照）。これらの事実から、「モントリオール議定書は機能しており、議定書で規定されている物質によるオゾン層破壊は、今後10年以内位までに改善に向かうと期待される」と明言された。

次の重要なステップは、成層圏オゾンと地上に到達する紫外線が、議定書により課せられたオゾン層破壊物質の規制に対して、想定される応答を示しているかどうかを問うことである（概略図1 c, d 参照）。この問いに答えるには、オゾン層破壊物質以外で、オゾンと紫外線に影響を及ぼす要因についても考慮する必要がある。これらの要因には、力学的自然変動、火山噴火、太陽活動の変動、エアロゾル（空气中を漂う細かい粒子）及び気候変化が含まれる。

オゾン及び紫外線の回復の指標として1980年以前の値がよく使われる。しかし、上記要因があるために、オゾンと紫外線が1980年以前の値に戻るかどうか、戻るとしたらいつなのかは、オゾン層破壊物質が1980年以前の値に戻ることと単純に結びつくわけではない（概略図1 c, d 参照）。

我々は、これまでのオゾン層破壊物質のふるまい、およびオゾン層破壊物質と他の要因に対する成層圏オゾンと紫外線の応答、それにオゾンと紫外線の今後の展開について言及する。まず、最近の主な発見を示し、次にそれらの詳細な根拠、そして最後に政策形成のための留意事項を示す。

1. 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：2002」の発表以来、多くの室内実験、大気観測及び理論・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線に対する影響に関する総合的理解が深まった。その進展ぶりが、気候変化と成層圏オゾン破壊との関係のほか、人間活動と自然現象がオゾン層に与える影響についての最新の理解を記した以下の要約の中で強調されている。

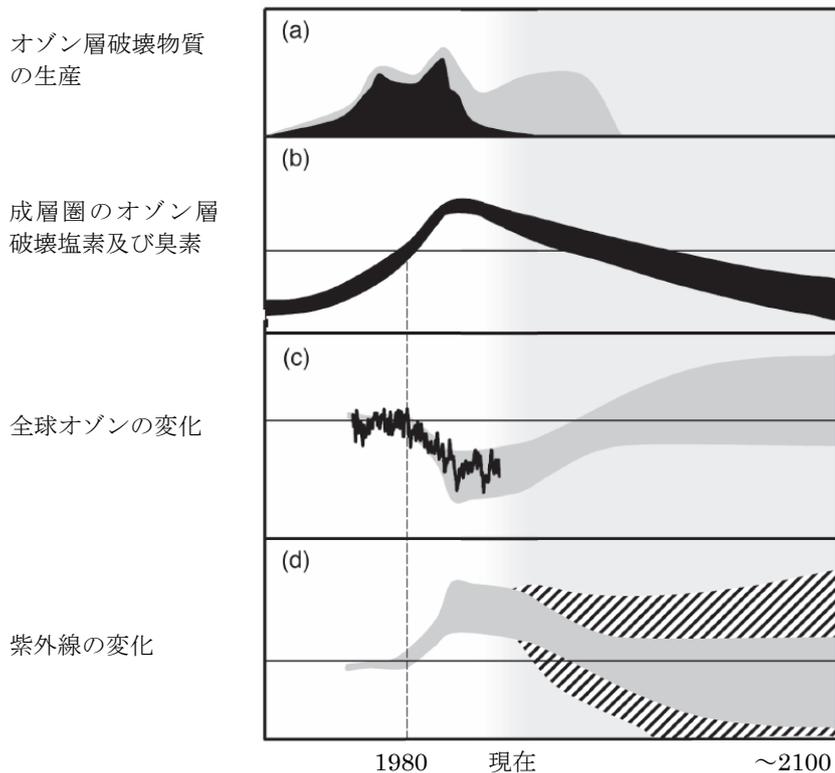


図1 オゾン層破壊物質、オゾン層及び紫外線：過去、現在、未来

(a) 1987年モントリオール議定書及びその改正の前と後のオゾン層破壊物質（ODSs）の生産量。基本シナリオA1より。クロロフルオロカーボン（CFCs）を黒で、ハイドロクロロフルオロカーボン（HCFCs）起源の追加的なODSsを灰色で示す。注）議定書のもと、CFCの代替として使用されるHCFCsはCFCsよりオゾン破壊効果が小さい。

(b) 成層圏のオゾン層破壊塩素及び臭素の総効果量
 グラフの幅は、異なる仮定のODS放出シナリオのほか、地上での放出と成層圏到達の時間差による不確実性を反映している。

(c) 全球オゾン全量の変化（極域以外：南緯60度～北緯60度）
 季節変動、準2年周期振動（QBO）、火山及び太陽活動の影響を取り除いた。黒い線は観測値を示す。灰色の領域は、将来可能性のある気候条件の範囲をカバーしたモデルにより予測されたオゾンの変化の様子を幅広く表したものである。縦の点線の左側は1980年以前の値で、オゾンや紫外線の回復の指標としてしばしば使われる。

(d) 南中時の紅斑紫外線量の予測される変化
 灰色の部分は、(c)で示したオゾン変化への応答の計算結果を示す。網掛け部分は、雲や大気中の微粒子（エアロゾル）の気候関連の変化により起こりうる紅斑紫外線量の変化のおおざっぱな見積もりを示す。

1.1 オゾン層破壊物質

前回のアセスメントでは、オゾン層破壊物質の量について、対流圏で減少している一方で、成層圏ではピークかそれに近い状態であると述べた。今、我々は問う。対流圏及び成層圏のオゾン層破壊物質の量は、政策行動に結びつくほどのさらなる変化を示しているか、また、その変化は将来どのように展開すると予想されるか？

- ・ 対流圏における人為起源のオゾン層破壊物質の総量は、1992～1994年のピーク時の値から減少し続けている。

- 比較的短寿命のガス（例えばメチルクロロフォルムと臭化メチル）は、対流圏における人為起源の塩素及び臭素を含むオゾン層破壊物質の実効的な総量の減少に大きく寄与し続けている。短寿命の物質が早く除去されることは、その後のオゾン層破壊物質の減少が、主に長寿命の物質の大気中における除去によってもたらされる可能性が高いことを意味する。
 - 2005年までに、対流圏における人為起源のオゾン層破壊物質の総量は、1992～1994年に観測されたピーク時の値から8～9%減少していた。この減少の全体規模は、予測された放出量の変化に起因するもので、既に知られている大気中の寿命及び輸送過程に対する我々の知見と矛盾しない。
 - 対流圏におけるHCFC-22、-141b及び-142bの濃度の増加は、前回のアセスメントでの予想に比べはるかに小さかった。このことは、これらのガスの放出量が予測より少なかったことを意味する。
 - 対流圏におけるハロンと臭化メチル起源の臭素の量は、臭化メチル量が減少したことにより、1998年以来3～5%減少した。臭化メチル量は1997年から2004年にかけて14%減少した。この減少は予想より大きく、このことは、臭化メチルの人為的放出が削減されれば、その大気中の量は以前考えられていたよりも減少することを示唆している。
- ・ **成層圏のオゾン層破壊物質の総量は、1990年代後半のピーク時の値から減少傾向を示している。このことは、これらの物質の地上観測結果及び成層圏までの輸送に要する時間と整合がとれている。**
 - 成層圏オゾン層破壊物質が、1990年代後半にピークに達して以来成層圏で減少していることを、塩化水素の観測結果が明瞭に示している。
 - 成層圏の臭素は、その先行する年の対流圏の傾向と同調して増加している。成層圏の臭素の減少はまだ確認されていない。臭素は成層圏オゾン層破壊において主要な役割を担い続ける。
- ・ **極短寿命のハロゲン物質が成層圏ハロゲン量にどう貢献しているかについての定量的な理解は、2002年のアセスメント以降大きく改善された。すなわち臭素系の極短寿命物質は成層圏の臭素総量に大きく寄与し、成層圏オゾンに大きな影響を与えていると信じられている。**
 - 臭素系の極短寿命物質（主に自然起源）は、現在の成層圏の臭素総量（約18～25ppt）に、臭素約5ppt（3～8pptの範囲と見積もられる）分寄与している。これらの値は、極短寿命物質の化学変化及び成層圏への輸送に関する我々の最新の知見に基づき、対流圏の臭素系ソースガス類及び成層圏の一酸化臭素の観測から導かれた。
 - 主に人為起源である塩素系の極短寿命ソースガス類は、熱帯上部対流圏で約50pptの濃度で観測されており、現在、成層圏塩素の小さなソースになっているかもしれない。
 - 臭素や塩素に比べ、ヨウ素の成層圏オゾンの破壊に対する重要度は現在のところはるかに低いことが示唆されている。

1.2 現在までのオゾン、紫外線及び他の関連の変化

前回のアセスメントで、成層圏オゾン破壊は今後 10 年以内位までに改善に向かうと期待されると記した。今、我々は問う。この改善の始まりの兆候はあるのだろうか。この期間、他の要因がオゾンのふるまいに影響を与えただろうか。地表に到達する紫外線は予想通りの応答をしたらだろうか。

- ・ 人為起源のオゾン層破壊物質が過去数十年間のオゾン層破壊の主要因となっているという我々の基本的な理解は強められている。オゾン層破壊物質の量がほぼ一定となった最近では、気象の変動が、極域及び極域以外の地域（南緯 60 度～北緯 60 度）の多くでオゾンのふるまいに特に重要な影響を与えている。

（極域オゾン）

- ・ 春季の極域オゾン層破壊は、成層圏の冬の低温のもと深刻な状態が続いている。過去数年間、両極域では、気象の変動が、観測されたオゾンの変動に大きな影響を及ぼしてきた。
 - 大規模な南極オゾンホールは出現が続いている。南極域のオゾン層破壊は、1990 年代後半からは深刻さの度合いは増大しておらず、2000 年以降は、オゾン量が以前に比べ増加した年もある。これら最近の変化は、診断解析によって程度の違いは見られるが、力学的な活動の活発化によるものであり、オゾン層破壊物質の減少によるものではない。
 - 南極オゾンホールは、現在、オゾン層破壊物質の緩やかな減少による影響を強く受けておらず、2002 年や 2004 年など、いくつかの年に見られた通常より小さいオゾンホールは、南極域の極渦の力学的変化に起因している。
 - 2002 年の南極オゾンホールの特異性は、それまでの 10 年間に比べ、オゾンホール面積が狭くオゾン破壊ははるかに小さいことで明らかにされた。この特異現象は異常に規模の大きい成層圏突然昇温によるものであった。
 - 北極域のオゾン層破壊は、気象条件によって左右され、大きな年々変動を示す。過去 40 年間、これらの条件は、北極域の極低温の冬期間における極域成層圏雲の形成に係る条件がますます拡大するにつれ、深刻なオゾン層破壊に一層結びつくようになった。この変化は、温室効果ガスの増加による直接的な放射効果から予測される変化よりはるかに大きい。この変化の理由は明確ではなく、長期自然変動か未知の力学過程によるものかもしれない。1990 年代半ば以降、温度条件の変化がいくつかの冬の大規模な北極域のオゾン破壊に寄与していた。
 - 北極域の 2004/2005 年冬季は異常に寒く、化学的なオゾン破壊が今までの解析の中で最も大きかった。北極域は大規模な化学的オゾン破壊に依然敏感で、極域成層圏雲発生の長期変化に関する知見の不足が、将来の北極域オゾン量の予測及び回復の兆しの早期検出を困難にしている。

- 極域成層圏における塩素及び臭素の化学反応の役割はより定量的に明らかにされている。これらの成果を取り入れることにより、北極域と南極域のオゾン破壊のタイミングに関する理論と観測とのよりよい一致が見られる。

(全球オゾン (南緯 60 度～北緯 60 度))

- 1990 年代に見られた極域以外の地域の成層圏オゾン量の減少は続いている。
 - 極域以外の地域 (南緯 60 度～北緯 60 度) のオゾン量のさらなる減少は近年見られない。2002～2005 年の中緯度オゾン全量値は、1980 年以前の値と比べて、北半球で約 3%、南半球で約 6%少なく、1998～2001 年の値と基本的に同じであった。
 - 極域のオゾン減少は中緯度のオゾン減少にかなり寄与しており、その寄与の大きさは、北半球では約 3 分の 1、南半球では約 2 分の 1 と見積もられる。南半球でのより大きな寄与は、北極域に比べてより大きな南極域でのオゾン層破壊によるものと推定され、両半球間の中緯度における長期オゾン変化の規模や季節性の違いも説明できるかもしれない。
 - 対流圏と成層圏の気象の変化が、1979 年から 1990 年代半ばにかけての北半球中緯度の冬季のオゾン減少とその後のオゾン増加に一部寄与している。長期変化傾向へのこれら力学的効果の定量的見積もりは、研究によって約 20%から 50%までの範囲にある。これら力学的に引き起こされたオゾンの変化のほとんどは成層圏最下層で起きているようである。
 - 上部成層圏オゾンは 1979 年から 1990 年代半ばにかけて減少し、中緯度の高度 40km 付近で減少率が 10-15%と最大となった。しかし、過去 10 年間は比較的一定の状態である。中緯度下部成層圏 (高度 20-25km) のオゾンもまた、1979 年から 1990 年代半ばにかけて 10%に達する減少が見られたが、その後は比較的一定の状態である。
 - 北半球中緯度の成層圏最下層 (高度 12-15km) のオゾン量は 1979 年から 1990 年代半ばにかけて著しく減少したが、1996 年から 2004 年にかけて全体的に増加し、この高度での正味の長期減少傾向が見えなくなった。この成層圏最下層のオゾンの変化は過去 10 年間のオゾン全量の変化に大きく寄与した。南半球の観測結果には、1990 年代半ば以降、高度 12-15km の同様な増加が見られない。
 - 熱帯域 (南緯 25 度～北緯 25 度) のオゾン全量は基本的に変化していない。このことは、今までのアセスメントの内容と一致している。
- 観測とモデル研究により、過去およそ 10 年間の南緯 60 度～北緯 60 度で平均したオゾン全量が基本的に変化していないのは、この期間の成層圏のオゾン層破壊物質がほぼ一定であることと関係していることが示唆される。
 - 過去 10 年間の中緯度上部成層圏 (高度 35-45km) のオゾン減少率の緩和及び濃度の一定化が、それに対応する成層圏のオゾン層破壊物質の変化に支配されていることは、かなり可能性が高い。
 - 過去 10 年間、成層圏のオゾン層破壊物質の変化は、中緯度オゾン全量の減少率の緩和と

全般的なオゾン量の一定化に寄与してきた可能性が高い。輸送もまたオゾンの変化に重要な役割を果たしてきており、特に成層圏最下層では、オゾン全量の変化の原因をオゾン層破壊物質の変化に求めるのは上部成層圏より困難である。

(成層圏の気温と地表到達紫外線)

- ・ 過去 20 年間観測された成層圏の寒冷化が近年は緩やかになった。
 - 衛星及びゾンデの観測によると、1979 年から 2004 年にかけて、下部成層圏の全球平均気温は約 0.5K/10 年の割合で減少が見られたが、1990 年代後半以降は、気温低下が緩やかになった。全体的な気温の低下は 1982 年と 1991 年の大きな火山噴火に伴う成層圏の一時的な昇温により中断されている。モデル計算によると、観測されたオゾン量の減少がこの期間に観測された全球平均の気温低下の主な原因であることが示唆される。
 - 下部成層圏の寒冷化はすべての緯度、特に両極域の冬から春にかけての下部成層圏で明らかであるが、これらの領域で大きな年々変動をともなっている。
 - 衛星観測によると、上部成層圏で 1~2 K/10 年の大きな寒冷化傾向が見られたが、1990 年代半ば以降は新たな低下はほとんどない。モデル計算によると、上部成層圏での傾向は、オゾンの減少及びよく混合された温室効果ガスの増加が同じ程度寄与していることが示唆される。
 - 南極域成層圏の長期的な寒冷化率も同様に、前回のアセスメント時までに見られた寒冷化率に比べて小さくなった。近年、南極域の気温には大きな変動が見られる。
- ・ 汚染されていない場所におけるいくつかの観測地点のデータによると、紫外線量（放射レベル）は 1990 年代後半以降、オゾンの増加に伴って減少している。しかし、北半球のいくつかの観測点では、紫外線に影響を及ぼす他の要因の長期変化のために紫外線量が依然増加している。極域以外の地域ではオゾン破壊が比較的小さい。したがって、多くの場所では、オゾン破壊による紫外線量増加を雲やエアロゾルの変化といった他の要因による増加と区別することが難しい。いくつかの汚染されていない観測点、特に南半球では、これらの観測点で観測されているオゾンの増加から予想されるとおり、近年、紫外線量が減少している。オゾンの予想のみ取り入れた紫外線量のモデル計算によると、紫外線に影響する他の要因が同時に変化する可能性が高いものの、雲がない状況での紫外線量は減少し続けることが示されている。
- ・ 極域では、一時的なオゾン全量の低下に伴って紫外線量の多い状態が 2~3 日続くことが観測されている。南極周辺地域では極域からオゾンの少ない空気が流れてくる時、数日間平均の紅斑（日焼けをおこす）紫外線量が約 70%増加する。10 月の南極大陸では、瞬間的にファクターで 3 を超える増加が観測されている。北ヨーロッパやアラスカでは、観測される増加は比較的小さい。

1.3 将来のオゾン層と地上到達紫外線

前回のアセスメント（2002年）では、気候変化が今後のオゾン層に影響を及ぼす可能性があるとして述べた。今我々は問う。この問題に対する我々の理解はどこまで進んだか？我々の進んだ理解によって将来のオゾン層の状態の見積もりが改善されたのか？

今までのアセスメントは将来のオゾン層を推定するにあたり2次元モデルに大きな信頼を置いており、今回もまた使われている。2002年のアセスメントでは、新たに登場した3次元化学—気候モデルの利用について述べた。今回の2006年のアセスメントで、我々は3次元モデルを幅広く利用している。

- ・ オゾン層破壊物質の量がピークに達し、減少に転じていることから、南緯60度～北緯60度の領域における平均オゾン全量が、1990年代の低い値より大きく下回って減少する可能性は低い。2次元モデル及び3次元化学—気候モデルによると、この領域のオゾン全量の最小値はすでに現れたと考えられる。この結論は、この領域では2002年から2005年の期間にオゾンのさらなる減少が見られなかったという観測結果と一致する。
- ・ オゾン層破壊物質の減少は、オゾン量の1980年以前のレベルへの予測される回復に対する主要因である。気候の変化は、いろいろな地域で、オゾン量が1980年以前のレベルに戻るのか、また戻るとしたら、いつ、どの程度までなのかに影響を与えるだろう。
 - 現在の最も確度の高い見積もりでは、全球（南緯60度～北緯60度）のオゾン量は21世紀の半ば頃に1980年以前のレベルに回復し、それは成層圏のオゾン層破壊物質の量が1980年以前のレベルに戻る時またはその前になるであろう。
 - モデルシミュレーションによると、気候の変化、特に、どの気候—ガスシナリオを使うかにもよるが、二酸化炭素量の増加に伴う成層圏の寒冷化が、全球のオゾン全量の1980年以前のレベルへの回復を最大15年早めるかもしれない。しかし、人為起源のオゾン層破壊物質による破壊は、依然として認識できるほどの大きさでオゾン量のレベルに影響を及ぼしていくであろうから、これにより、成層圏オゾンがオゾン層破壊物質による破壊から「回復」したと考えることはできないであろう。
- ・ 南極オゾンホールは、引き続き今後数十年間現れると予想される。南極域のオゾン量は2060～2075年頃に1980年以前のレベルに戻ると見積もられる。これは2002年のアセスメントの見積もりより約10～25年遅い。この遅い回復の見込みは、主に、極域におけるオゾン層破壊物質の将来の変化をより正確に見積もったことによる。今後20年間に、南極オゾンホールが大きく改善することは期待できない。
- ・ 今後15年間、北極域の寒い冬には大規模なオゾン層破壊が起こり続ける可能性が高い。こうした寒い冬において極域成層圏雲の規模に大きな変動があることが、その将来の発生予測を困難なものにしている。化学—気候モデルによると、北極域のオゾン量は、平均して、2050

年までに 1980 年以前のレベルに回復すると予想される。

- ・ 気候変化は、主として雲や地面反射率に引き起こした変化を通じて、地表到達紫外線にも影響を及ぼすだろう。エアロゾルや大気汚染物質もまた将来変化するであろう。これらの要因は、吸収または散乱を通じて、地表到達紫外線量の増加または減少のどちらかをもたらすだろう。オゾン層破壊の規模が小さくなるにつれ、これらが将来の紫外線量を決める主要因となる可能性が高い。

2. 科学的根拠の補足と関連情報

本報告書では便宜上、オゾン層破壊物質は、長寿命（大気中で 6 か月より長い）または極短寿命（大気中で 6 か月より短い）のどちらか一方と考え、次の 2 つの節でこれらについて考察する。大気中の寿命は、対流圏に放出されたハロゲンが成層圏に達し、成層圏オゾンを破壊する可能性を決定する。成層圏のハロゲンの累積実効量を等価実効成層圏塩素（EESC）¹として定量化する。

2.1 長寿命オゾン層破壊物質

（大気中の変化傾向）

- ・ クロロフルオロカーボン類（CFCs）より短寿命のメチルクロロフォルム及び臭化メチルの量の減少は、実効等価対流圏塩素量の減少のほとんどに寄与した。2005 年までに、対流圏における人為起源のオゾン層破壊物質の総量は、1992～1994 年に観測されたピーク時の値から 8～9%減少していた。2000 年から 2004 年までの総減少量は約 120ppt で、そのうち、メチルクロロフォルムの減少は約 60ppt、臭化メチルの減少は約 45ppt であった。CFCs 全体としての減少量は 23ppt より少なかった。ハイドロクロロフルオロカーボン類（HCFCs）の寄与は 12ppt であった。
- ・ 対流圏における塩素を含む化学物質の総量（2004 年で約 3.44ppb）は減少し続けた。最近の減少率（20ppt/年すなわち 2003 年～2004 年で 0.59%）は、主にメチルクロロフォルムの寄与が減ったため、それ以前の減少率（23ppt/年すなわち 1999 年～2000 年で 0.64%）に比べて少し小さくなっている。2000 年から 2004 年にかけての塩素総量の減少割合は、前回（2002 年）のオゾンアセスメント報告の Ab シナリオ（1999 年の北京改正に沿った基本シナリオ）での同期間の見積もりよりも少し速かった。

¹ 等価実効成層圏塩素（EESC）は、前回のアセスメントに記された測定基準で、幅広い利用に供されることがわかった。EESC は、成層圏のオゾン層破壊ハロゲン全体の負荷指標である。オゾン層破壊物質に含まれる塩素及び臭素原子の数、異なるオゾン層破壊物質が成層圏に達したときのハロゲン放出率、及び塩素に比して臭素の 1 原子あたりの高いオゾン破壊効率を考慮して、オゾン層破壊物質の地上観測データから導出される。

- 主に CFC-11、-12 及び-113 から成るクロロフルオロカーボン類は、2004 年の総塩素量の中で 2.13ppb (～62%) を占め、2003 年～2004 年の塩素減少のうち 9ppt を占めた (すなわちこの期間の対流圏の総塩素減少量のほぼ半分)。現在の大気中の塩素量のおよそ 3 分の 1 を占める CFC-12 の混合比は、2000 年以降 1% (5ppt) 以内で一定で、北半球のいくつかの地上観測結果から 2003 年にピークに達したことがわかる。CFC-11 の混合比は約 0.8%/年 (1.9ppt/年) の割合で、また CFC-113 の混合比は約 1%/年 (0.8ppt/年) の割合で減少しており、これは 1999～2000 年に比べて 2 倍の速さである。
 - CFCs の代替物質であるハイドロクロロフルオロカーボン類 (HCFCs) は大気中で増え続けている。HCFCs は、2000 年には対流圏の総塩素量の 5%、180ppt だったのに対して、2004 年は 6%、214ppt であった。HCFCs のうち HCFC-22 が最も多く、現在 (2000～2004 年)、4.9ppt/年 (3.2%/年) の割合で増加している。HCFC-141b 及び HCFC-142b の混合比は、同じ期間、それぞれ 1.1ppt/年 (7.6%/年) 及び 0.6ppt/年 (4.5%/年) の割合で、すなわち 1996～2000 年の半分の増加率で増加した。これら 3 種類の HCFC 化合物の増加率は 2002 年オゾンアセスメントの見積もり (HCFC-22、HCFC-141b、HCFC142b に対してそれぞれ 6.6、2.6、1.6ppt/年) に比べて大幅に小さくなった。
 - メチルクロロフォルムは減少し続け、2003～2004 年の対流圏塩素総量の観測された全減少量のうち 13.5ppt (すなわち半分以上) であった。現在も対流圏塩素の減少に最大の寄与をしている。
- ・ 無機塩素の地上全量観測及び衛星観測から導出される成層圏塩素負荷量は現在減少している。これは、長寿命のハロカーボン起源の対流圏塩素の減少と一致している。衛星観測から導出される成層圏塩素総負荷量は、地上観測データから輸送による時間差を考慮して予測した量と 0.3ppb (約 12%) 以内で一致する。この負荷量の不確かさは、予測される短寿命ガス起源の塩素量と比べて大きい。
 - ・ ハロン及び臭化メチル起源の対流圏有機臭素の総量は、1998 年頃に 16.5～17ppt でピークとなり、それ以降 0.6～0.9ppt (3～5%) の割合で減少した。この観測された減少は、もっぱら観測された臭化メチル減少の結果である。ハロン起源の臭素は増加し続けているが、近年の増加率は小さい (2003 年～2004 年で 0.1ppt Br/年)。
 - 大気中の臭化メチルの量は、工業生産が削減された 1999 年を始まりとして減少している。2004 年半ばまでに、混合比は 1999 年以前に測定された 9.2ppt のピークから 1.3ppt (14%) に減少した。放出利用分野の臭化メチルの報告された生産量は、同じ期間に 50%減少した。
 - 大気中の臭化メチルの近年観測された減少及び推定される 20 世紀の増加の両方とも予測より大きかった。臭化メチルの産業からの放出量は、1992～1998 年 (生産削減前) の大気中の臭化メチル量の 20% (10～40%の範囲) と考えられていたが、観測された濃度は、30% (20～40%の範囲) であったとする割合と整合している。このことは、燻蒸関係の放出が大気中の臭化メチル混合比に及ぼす影響は、自然放出率と損失の変動及び近年蓄積された臭化メチル量の不確かさのためにこの影響の大きさに対する我々の理解不足はあるもの

の、過去のアセスメントの見積もりよりも大きかったことを示す。

- 最新の放出量見積もりから混合比を計算すると、ハロン-1211 の観測値とは良い一致をみる。しかし、ハロン-1301 については、1980 年以降のすべての観測値に対して計算値が 10% 以上上回っている。2000 年～2004 年のハロン-1211 の大気中の増加量は、1996 年～2000 年のその約半分だった。ハロン-1301 が増え続けるかどうかは今のところはっきりしない。

(放出量の見積もり)

- 2003 年の CFC-11、CFC-12 及び CFC-113 の全球放出量はそれぞれ 88Gg/年 (1Gg=10⁹ グラム)、114Gg/年及び 6Gg/年で、1986 年頃のこれらの最大値に比べて、それぞれ約 25%、25%及び 3% であった。CFC-11、CFC-12、CFC-113 の放出量は 2000 年以降すべて減少し続けている。
- CFCs、メチルクロロフォルム及び四塩化炭素の地域放出量の見積もりが初めて報告された。先進地域と途上地域との違いはそれぞれの段階的削減時期の違いを示唆している。しかし、現在の把握範囲の不十分さ（特に東南アジアなどの発展地域）と地域見積もりの不確かさにより、地域放出量の見積もりの合計と変化傾向から導出される全球放出量との有益な比較は現時点では行えない。メチルクロロフォルムの地域放出量見積もりから、2000 年以降の全球放出量は概ね 22Gg/年と示唆され、これは国連環境計画 (UNEP) のデータによる産業からの放出量見積もり 12.9Gg/年 (2002 年) と統計的に異なっていない。
- HCFC-22 の放出量が 2000 年から 2004 年までの間ほとんど一定であったのに対し、HCFC-141b と HCFC-142b の放出量は同じ期間に、約 15%減少した。
- 大気観測から見積もられたハイドロフルオロカーボン-23 (HFC-23) の放出量は、1990 年の約 6Gg/年から 2001 年の約 13Gg/年に増加した (約 120%の増加)。これらの放出は HCFC-22 の生産の副産物である。HFC-23 の混合比 (2004 年で 18ppt) は、2001 年～2004 年に、約 0.7ppt/年 (4%/年) の割合で増加し続けた。

2.2 極短寿命ハロゲン物質

- 観測結果から、成層圏の無機臭素 (Br_y) の総量が、長寿命の臭素系ソースガス類により成層圏に送り込まれた臭素の合計によって説明される量よりも多いことが示される。極短寿命物質 (VSLs) は、対流圏での寿命が対流圏輸送の時間スケールと同等かそれより短い微量気体として定義され、対流圏での分布が様々ではない。VSLs の大気中での寿命は 6 ヶ月以下と考えられる。
- 様々な一連の証拠から、臭素系 VSLs は成層圏の全 Br_y に対して約 5ppt (3~8ppt の見積もり範囲) 寄与していることがわかる。

- 1990年代後半に大気中に存在した全 Br_yの見積もり量は約 18~25ppt である。この値は、一酸化臭素 (BrO) の異なる観測結果から導かれる。これは、同じ時期に長寿命の臭素系ソースガス類 (すなわち、ハロンと臭化メチル CH₃Br) によって成層圏に送り込まれた臭素 16~17ppt より多い。
- 熱帯上部対流圏の極短寿命の有機臭素系ソースガス類の観測値は約 3.5ppt である。ソースガス類の分解から生じた化合物及び対流圏無機臭素の他のソースは同程度の量の貢献をしているかもしれない。
- ・ **成層圏の全臭素量は、対流圏の全臭素量と一致した変化傾向を示し続けている。**対流圏臭素の最近の減少が、成層圏臭素量に反映されているかを見定めるにはさらなる研究が必要である。
- ・ **ヨウ化物が、現在の大気中の成層圏オゾン損失に重要である可能性は低い。**下部成層圏に一酸化ヨウ素の形で測定可能なヨウ素 (すなわち約 0.1ppt) が存在する証拠はほとんどない。臭素と比較したふるまいの違いは、ヨウ素系ソースガス類の短い光化学寿命とその量の少なさ、そして成層圏でのエアロゾルによるヨウ素取り込みに一部起因しているかもしれない。
- ・ **熱帯上部対流圏の極短寿命ソースガス類起源の塩素含有量は、現在では約 50ppt と見積もられている。**VLSL 起源の無機塩素 (Cl_y) 50ppt は長寿命のソースガス類起源の Cl_y (約 3500ppt) の 1~2%にしかならないが、自然発生の塩化メチル (550ppt) のみによるバックグラウンドの Cl_yには大きく寄与するだろう。前回アセスメントの短寿命物質起源の Cl_yの 100ppt はホスゲンからの寄与分 50ppt も含んでいた。
- ・ フィルン空気の研究から示されるように、**既知の極短寿命の臭素・ヨウ素系ソースガス類の大部分はほとんど自然起源で、過去数十年間ほとんど変化していない。**いくつかは少量の人為起源を持ち、北半球でわずかに増加しており (例えばある種の臭化トリハロメタン)、また二、三は、ほとんど人為起源のみである (特に n-プロピル臭素 (n-PB))。
- ・ 自然起源も寄与しているが、**極短寿命の塩素系ソースガス類の多くは人為放出によっている。**いくつかの極短寿命の塩素系ソースガス類、とりわけクロロフォルム、ジクロロメタン、テトラクロロエタンの量が最近大きく減少したことを示す根拠がある。
- ・ **VLSL が成層圏に達する最も可能性の高いルートは、熱帯域 (特に熱帯海洋上の大量放出域と一致する場合) の深い対流によって境界層を抜ける輸送と、それに続く下部成層圏への準水平輸送によるものである。**成層圏へ輸送されたソースガス類と生成ガスの割合も、ソースガス類が分解する場所の化学的寿命及びエアロゾルや雲が関係する不均一過程による生成ガスの損失に依存している。

2.3 全球オゾン（南緯 60 度～北緯 60 度）

（オゾン全量）

- ・ 2002～2005 年の全球平均オゾン全量は、1964～1980 年平均より 3.5%少なかった。2002～2005 年の値は 1998～2001 年の値に似ている。このふるまいは、すべての利用可能な全球データセットの年平均値間で最大 1%の違いはあるものの、明らかである。
- ・ 両半球で、中緯度におけるオゾン全量の変化の様子に次のような違いが認められる。
 - 2002～2005 年平均の北半球と南半球の中緯度（35 度～60 度）のオゾン全量は、1964～1980 年平均よりそれぞれ 3%及び 5.5%少なく、1998～2001 年の値に似ている。北半球では 1993 年頃に最小となり、その後増加している。南半球では、1990 年代後半まで減少し続け、最近は横ばいである。
 - 中緯度のオゾン変化には、北半球と南半球の間で季節による違いがある。北半球中緯度（北緯 35 度～北緯 60 度）の 1980 年以前からの変化は春季に大きいが、南半球中緯度（南緯 35 度～南緯 60 度）のそれは一年を通じてほとんど同じである。
- ・ 熱帯域（南緯 25 度～北緯 25 度）のオゾン全量は基本的に変化していない。このことは、今までのアセスメントの内容と一致している。

（鉛直オゾン分布）

- ・ 上部成層圏オゾンは 1979 年から 1995 年にかけて減少したが、過去 10 年間は比較的一定となっている。成層圏エーロゾル及びガス実験衛星（SAGE I+II）及び太陽後方散乱紫外線分光計（SBUV (/2)）衛星からの観測によると、北緯 60 度～南緯 60 度、高度 35km～50km の平均で 1995 年まで大きな減少を示している。中緯度の正味のオゾン減少量は、熱帯域での小さいが有意な変化を伴いつつ、最大 10～15%であった。利用可能な独立した反転、ライダー及びマイクロ波オゾン観測がこれらの結論を裏付けている。
- ・ 下部成層圏オゾンは 1979 年から 1995 年にかけて減少したが、過去 10 年間は大きな変動を伴いつつも比較的一定となっている。南北両半球の中緯度では、SAGE I+II 及び SBUV (/2) 衛星からの観測によると、高度 20～25km で 1995 年までに最大 10%の減少を示している。これらの減少は最近 10 年間はみられなかった。
- ・ 北半球の成層圏最下層の高度 12～15km では、1979 年から 1995 年にかけてオゾンの大きな減少が観測され、その後 1996 年から 2004 年にかけて全体的に増加し、この高度での正味の長期減少傾向が見えなくなった。成層圏最下層のこれらの変化はオゾン全量に大きく影響している。南半球中緯度のデータには、これらの高度で 1995 年以降の同様な増加は認められない。

(全球オゾンの過去の変化の理解)

- ・ 極域以外のオゾンの観測された長期変化とハロゲン増加の効果を取り入れたモデルシミュレーションは概ね良い一致を示している。モデルは、高度、緯度及び季節の関数として、観測されたオゾンの変化を概ね再現しており、ハロゲンの変化が全球オゾンの変化の主要因であるという我々の理解を立証している。この関係は、全球平均のオゾン観測値と等価実効成層圏塩素 (EESC ; この節の最初のページの脚注を参照) との統計的な適合性により裏付けられている。しかし、モデル計算による変化と観測される変化との間には相違がみられる。特に、北半球に比べて、南半球での変化のシミュレーションが劣る傾向がある。
- ・ 経験的及びモデル研究から、対流圏及び成層圏の力学場の変化が、観測された北半球中緯度の 1979 年から 1990 年代半ばまでのオゾンの減少とその後の増加に一部寄与していることが示される。これが力学場の変動性によるものか成層圏循環の長期変化傾向の結果によるかはまだはっきりしない。長期変化におけるこれらの力学的効果の見積もりは冬季については約 20~50%の範囲である。
- ・ 極短寿命物質 (VSLs) 起源の追加的な無機臭素をモデルに取り込むと、長寿命の臭素系ソースガス類のみを取り込んだ研究に比べて、中緯度と極域でより大きなオゾン破壊がシミュレートされる。両方の地域で、この臭素と人為起源の塩素との相互作用を通じて、下部成層圏でオゾン損失が強化される。中緯度のオゾン損失はエアロゾルの高濃度期間に最も強化される。臭素と水素酸化物 (HO_x) の関係する化学反応を通じたオゾン損失もすべての条件下で中緯度で強化される。VSLs Br_y が一定と仮定すると、中緯度オゾンの長期変化傾向 (1980~2004 年) への影響は、この期間の初めと終わりでエアロゾル濃度が低いため、小さく計算される。
- ・ いくつかの独立したモデル研究により、オゾンが減少した極域の空気の希釈は、中緯度、特に極域のオゾン損失がはるかに大きい南半球の中緯度のオゾン減少に大きく寄与していることが確認されている。長期年平均モデルをベースとした見積もりによると、(大きな年々変動はあるが) 北半球のオゾン減少の約 3 分の 1、南半球の約 2 分の 1 が極域の損失によるものと示唆される。このことは、南極域春季のオゾン減少は南半球夏季の中緯度オゾン減少と強いつながりがあるという観測結果によって裏付けられる。
- ・ 過去 15 年以上、大規模な火山噴火がなかったために、観測されたオゾンの中の太陽周期シグナルのより正確な特定が可能となった。拡張されたデータシリーズより、オゾン全量における太陽周期変動は低緯度から中緯度にかけて 2~3% (最小から最大) の平均振幅を持っていると推測される。

2.4 極域オゾン

(北極域)

- ・ 過去 10 年間の北極域の春季オゾン全量値は、1980 年代の観測値よりも少ないが、1990 年代の観測値よりも幾分大きい。これらは力学的な条件により大きく変動する。現在のハロゲン量のために、人為的・化学的損失及びオゾン輸送の変動は年々の北極域オゾンの変動にとって同じくらい重要となっている。平年よりも低い北極の極渦の気温は、ハロゲンによるより大きな化学的オゾン損失を招く。
- ・ 非常に寒かった北極域の冬に関して、極域成層圏雲の形成に十分な低温の空気体積 (V_{PSC} と呼ぶ) が、1960 年代後半以降、大きく増加している。この変化は、温室効果ガスの増加による直接的な放射効果から予測される変化よりはるかに大きい。この変化の理由は明確ではなく、長期自然変動か未知の力学過程によるものかもしれない。
- ・ 2004/2005 年北極域冬季のオゾン全量の化学的損失はかつて解析された中で最も大きかった。2004/2005 年の北極域成層圏は、特に高度 18km 以下で例年になく寒く、過去の記録より 25% も大きい V_{PSC} が形成された。様々な独立した研究及び手法によると、2004/2005 年の化学的オゾン全量損失は、かつて観測された中で最大であったことが示唆される。
- ・ 北極域冬季の化学的オゾン損失は各冬季の V_{PSC} と線形に近い関係を示している。オゾン損失と V_{PSC} の間の同様な関係は、今では化学的オゾン損失の 2 つの独立した解析にも見られ、この関係が揺るぎないとの確信が深まっている。観測された 2004/2005 年の大規模な北極域オゾン損失は、それ以前の冬に立証された関係と整合している。

(南極域)

- ・ 大規模な南極オゾンホール出現が続いている。南極域のオゾン層破壊は、1990 年代後半からは深刻さの度合いは増大しておらず、2000 年以降は、オゾン量が多かった年もいくつかある。これら最近の変化は、明らかに診断基準によって程度の違いはあるが、力学的波動活動の活発化によるものであり、オゾン層破壊物質の減少によるものではない。
- ・ 2002 年 9 月、南半球で過去最も規模の大きい成層圏突然昇温が発生した。この早春の昇温はオゾンホール面積の劇的な減少をもたらした。この昇温は南半球の例年になく強い力学的波動活動によるものであった。2004 年冬季の南極域もまた力学的に変化活発で、それまでの年に比べてオゾン量が多かった。

(全般)

- ・ 極域成層圏の気温の大きな年々変動が気温変化傾向の解釈を複雑にしている。極域の気温変化傾向について過去に報告された見積もりは、アセスメントごとに違っている。振り返って考えると、10～20年の時間スケールで求められた気温変化傾向は、統計的に有意に見えるかもしれないが、観測された気温には大規模な年々変動及び10年変動があるために、確固としたものでなかったことは明らかである。それゆえ、気温変化傾向の報告された変化は、必ずしも物理または化学過程の系統的な変化を示すものではない。
- ・ 極域オゾンの化学的損失率は、1) 2個の一酸化塩素(ClO)分子の関係する、より効率的なオゾン破壊(ClO二量体サイクル)反応、及び、2) より高い臭素濃度、という二つを仮定したモデル計算の中で顕著に増大する。より高い臭素濃度という仮定は、自然起源の炭化臭素類が成層圏の臭素収支において重要な役割を果たすという新しい事実に基づく。ClO二量体サイクルによるより効率的なオゾン破壊は、ClO二量体の最初の成層圏での観測結果の解析で裏付けられている。モデルのこれら2つの変更は、過去のアセスメントに記された北極域オゾン損失率についての観測とモデルとの比較を改善する。これらの変更はまた、南極大陸上空のオゾン損失のタイミングについての理論と観測の比較を改善する。
- ・ 硝酸三水和物(NAT)の極域成層圏雲の雲粒が氷結点より高い温度で凝結可能であること、それらの広範囲の発生に関するさらなる証拠があることを観測データが初めて示している。広範囲の低密度NAT雲は脱室を促し、オゾン損失を強める。氷結点より高い温度でのNAT凝結を化学輸送モデルに取り入れることで、脱室のシミュレーションが改善されたが、年々変動の不一致はそのままである。これはおそらくNAT凝結のメカニズムが完全に理解されていないからであろう。

2.5 気候変化の影響

- ・ 過去20年間観測された成層圏の寒冷化が近年は緩やかになった。
 - 衛星及びゾンデの観測によると、1979年から2004年にかけて、下部成層圏の全球平均気温は0.5K/10年の割合で減少が見られたが、1990年代後半以降は、気温低下が緩やかになった。全体的な気温の低下は1982年と1991年の大きな火山噴火に伴う成層圏の一時的な昇温により中断されている。前回アセスメントと同様、モデル計算によると、観測されたオゾン量の減少がこの期間に観測された全球平均下部成層圏の気温低下の主な原因であることが示唆される。
 - 下部成層圏の寒冷化はすべての緯度で明らかである。北極域下部成層圏の年平均気温は1979年から2004年の間に約1K低下した。冬季と春季の大きな年々変動が続いているため、北極域下部成層圏の信頼できる傾向を決定することは困難である。
 - 南極域下部成層圏の気温の大きな年々変動が近年明らかとなった。このことは、前回アセスメントのこの地域における10年スケールの寒冷化傾向の見積もりを減らすこととなった。

- ・ 衛星観測によると、上部成層圏で大きな全球平均寒冷化傾向（1979～2004 年までに 1～2K/10 年）が見られたが、1990 年代半ば以降は新たな低下はほとんどない。観測された上部成層圏の変化傾向には、オゾンの減少及びよく混合された温室効果ガスの増加がほぼ同じ寄与をしているという前回アセスメントの結論が再確認されている。
- ・ **将来の温室効果ガスの増加が、成層圏の平均的な寒冷化に寄与するであろう。** 気候モデル（AOGCM、大気海洋結合モデル）及びオゾンとの相互作用を取り入れた化学-気候モデル（CCM）は、ともに全球平均成層圏気温の連続的な低下を予測している。次の 20 年間に予測される寒冷化率は、アセスメントで使われた規定のシナリオ及びモデルの型に依存している。50hPa（高度約 20km）で、すべての AOGCM の平均で約 0.1K/10 年、一方 CCM はオゾン変化の相互作用を考慮してより大きい約 0.25K/10 年の低下を予測している。すべてのモデルは 10hPa（約 30km）で平均約 0.5K/10 年のより強い寒冷化を予測している。将来の極域の気温のシミュレーションは、大きな年々変動のために全球平均気温よりも不確実である。
- ・ **大気中の化学反応速度は気温に依存する。よって、オゾン量は気温の変化に敏感である。** 上部成層圏の気温低下は、この領域の光学的オゾン破壊率を緩和している。よって、上部成層圏のオゾン量は寒冷化に対応して増加する。極域下部成層圏の寒冷化はエーロゾルと極域成層圏雲でのより効率的な塩素活性化を促し、オゾン破壊を強めるであろう。それゆえ、春季の極域下部成層圏のオゾン量は寒冷化に対応して減少するであろう。

（成層圏と対流圏の相互作用）

- ・ **成層圏の気温と循環場の変化は対流圏の気候と天気に影響を及ぼす。** この関連性の一致した証拠は観測結果の解析とモデルの両方から得られるが、そのメカニズムについてはよくわかっていない。対流圏における顕著な応答は、中緯度の西風（西からの卓越風）の強さの変化である。観測及びモデルから、南極域のオゾン破壊は、その下部成層圏の極渦への影響を通じて、12 月から 2 月までの観測される対流圏の風の強化及び南極域の地表の寒冷化に寄与したことが示される。
- ・ **成層圏水蒸気量の最新のデータセット間には、長期のふるまいの点で違いが見られる。** 2 つだけではあるが、利用可能な複数年データセットに基づいた最近のトレンド解析は、前回アセスメントに記された成層圏水蒸気の正の変化傾向に疑問を投げかけた。コロラド州ボルダーでの 1980 年から 2005 年までの気球による水蒸気観測は、15～28km の高度で 5～10%/10 年という大きな増加を示している。1991 年から 2005 年にかけてのハロゲン掩蔽実験（HALOE）衛星による全球水蒸気観測は、下部成層圏の対応する正の変化傾向を示していない。HALOE データから導かれた水蒸気の年々変動は、熱帯対流圏界面付近の気温変動と量的な一致を示している。逆に、ボルダーのデータから推察される長期増加量は、観測される対流圏界面気温の変化や過去の対流圏メタンの増加から説明可能な量より大きい。

2.6 21世紀のオゾン層

- ・ 過去 10 年間の中緯度上部成層圏（35～45km）オゾンの減少の緩和及び横ばい状態は等価実効成層圏塩素（EESC）の変化に左右されている可能性がかなり高い。気相化学は、気温及びメタンなどの他のガスの変化による変調を受けながら、この領域のオゾンを直接制御しており、観測されるオゾンの増加は EESC の減少から求められたモデルの傾向と似ている。
- ・ 過去 10 年間、EESC の変化は中緯度オゾン全量の減少の緩和及びオゾン全量の横ばい状態に寄与してきた可能性が高い。輸送も、特に成層圏最下層で重要な役割を果たし、オゾンの変化の原因を EESC だけに求めるのを困難にしている。北半球の中緯度では、オゾンの増加量は EESC の減少のみから期待される量より大きく、一方、南半球の中緯度では、オゾンの変化は EESC 減少から期待される範囲とよく一致している。
- ・ EESC の減少は、北極域のオゾン破壊に見られる大きな年々変動を引き起こしていない。事実、北極域におけるオゾン回復の始まりは検出されていない。気象の変化によって引き起こされる大きな年々変動は回復の第一段階の検出を妨げる可能性が高い。

（モデル予測）

21 世紀を通じてのオゾンのふるまいを予測するために、オゾンに影響を及ぼす多くの要因及びそのフィードバックを取り込んだ 2 次元モデル及び 3 次元化学－気候モデル（CCM）が、本アセスメントで使用されている。下記の結論を導き出したモデル予測は、「IPCC 第 3 次評価報告書：科学的基礎」のよく混合された温室効果ガス同様、2002 年オゾンアセスメントの Ab シナリオ（北京改正に従った基本シナリオ）による地上のハロカーボン類の時系列に基づいている。長期変化に焦点を絞るため、予測されたオゾン偏差は 10 年スケールの平滑化を行った。

- ・ 将来のオゾン量を予測するために使われた CCM は厳しく評価され、オゾン全量に強く影響を及ぼすことが知られている過程を最もよく表すモデルがより強調された。CCM は大気中の異なる過程や特徴を表現することにおいて、それぞれ違ったスキルを持っている。しかし、大多数の CCM と観測値は十分に一致しているため、それらの予測結果にある程度の信頼を置くことができる。
- ・ 南緯 60 度～北緯 60 度の平均で、オゾン全量は 2000 年から 2020 年までに 1%～2.5%増加し、その領域の EESC が 1980 年の値に減少する時（2040～2050 年）と同時かその前に 1980 年の値に到達すると予測されている。2100 年までにオゾンは 1980 年の値より 5%まで多くなるはずである。2 次元モデル及び CCM はともに、オゾン全量の最小値がすでにこの領域で現れたことを示唆している。よく混合された温室効果ガスと気温の関連性を含むほとんどすべてのモデル（相互作用を持つ 2 次元モデルと CCM）で、EESC が 1980 年の値に戻ったときオゾンは 1980 年以前の値より多くなる。同様に、2100 年にオゾン量が増加することは、相互作用を持つす

べての2次元モデル及び2100年まで計算期間を拡張した1つのCCMの結果に表れている。

- ・ 南極域の春季のオゾンは2000年から2020年にかけて5%~10%増加し、南極域のEESCが1980年の値に減少する頃(2060~2075年)に1980年の値に達し、その後ほとんど変化しないと予測される。オゾン破壊の異なる診断指標はEESCへの異なる応答を示す。最も早い変化(減少)はオゾン欠損量に、最も遅い変化(増加)はオゾン最小値と10月のオゾン偏差に現れる。オゾン最小値は多くのモデルで2000年から2010年の間は概ね一定のままである。多くのモデルで、オゾン欠損量の減少の始まりは2000年と2005年の間、南極域オゾン最小値の増加の始まりは2010年以降と予測されている。
- ・ 北極域の春季のオゾンは2000年から2020年にかけて0%~10%増加し、北極域のEESCが1980年の値に減少する(2060~2070年)よりはるかに早く1980年の値に達すると予測される。2100年までに、北極域のオゾンは1980年以前の値をかなり上回ると予測される。予測される北極域オゾンの大きな年々変動が、EESCの減少によるオゾン増加転向の時期を不明瞭にするが、これは2020年より前に起こると予想されている。北極域のオゾン増加は南極域ほど密接にEESCに追従せず、大多数のCCMで北極域のオゾンは南極域よりも早く1980年の値を超える。北極域のオゾン全量が将来大きく減少することを示すモデルシミュレーションはない。北極域成層圏のオゾン破壊が比較的小さく年々変動が比較的大きいことのために、北極域のオゾンの予測には大きな不確実性がある。
- ・ 2100年に予測されるオゾンは、よく混合された温室効果ガスの将来の濃度に敏感である。例えば、将来増加が予想される一酸化二窒素(N_2O)は成層圏の窒素酸化物(NO_x)を増加させ、オゾン破壊を悪化させるかもしれない。しかし、二酸化炭素(CO_2)を中心とした温室効果ガスの増加により引き起こされる成層圏の寒冷化は、気相のオゾン破壊反応を鈍らせ、それによってオゾンが増加すると予想される。オゾン量への正味の効果は、種々のよく混合された温室効果ガスの将来の濃度に依存する。この気温のフィードバックの重要性は、相互作用を取り入れていない2次元モデルが、極域以外のオゾン全量は今世紀の後半を通じて1980年の値より少ないかそれに近いと予想していることから明らかにされている。
- ・ 人間活動は、対流圏の微量気体の放出量の変化を通じて成層圏オゾンに影響を及ぼすと予想される。(湿潤化し昇温した土壌からの)メタン(CH_4)放出量の増加は下部成層圏のオゾン生成を促し、一方、(人工肥料の過剰使用による)一酸化二窒素の増加は、中・上部成層圏のオゾンを減少させると予測される。また、非メタンハイドロカーボン類や NO_x の放出は対流圏のOHラジカルの濃度に影響し、メタンや有機ハロゲン物質などの成層圏微量ガスの寿命と濃度に影響を及ぼすと予想されている。
- ・ 成層圏水蒸気量の将来の変化は不確実である。もし将来水蒸気量が増えれば放射及び化学の両方の影響があるだろう。モデル研究は、水蒸気量の増加は成層圏の HO_x を増加させ、結果的にオゾン破壊に影響することを示唆している。極域での水蒸気の増加は極域成層圏雲の形

成の閾値温度を上昇させ、春季のオゾン破壊を増加させる可能性がある。

2.7 紫外線とその変化

- ・ いくつかの汚染されていない場所での観測によると、紫外線量は 1990 年代後半以降減少している。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が 10 年あたり数%の割合で増加し続けた。観測された増加とその有意性は場所、波長帯及び観測期間に依存している。これらの増加はオゾン破壊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消散及び大気汚染の減少傾向に起因し、また衛星から見積もられるように雲の減少の影響も一部考えられる。
- ・ 対流圏エアロゾルは、地表に到達する紫外線量導出のため太陽後方散乱紫外放射を利用する衛星観測機器（例えば TOMS：オゾン全量マッピング分光計）からの紫外線の過剰見積もりの原因となっている。空気の清浄な観測点では、地上からの観測結果とよく一致している。しかし、汚染された場所では、吸収性エアロゾルを含む大気最下層が観測で適切に探査できないため、バイアスは 40%の大きさにも達する。雲の存在や雪氷の被覆も大きなバイアスにつながる。改良型高解像度放射計（AVHRR）画像とメテオサットの衛星画像を使用した雲の効果に加えて、衛星から導出される地表の紫外線に対するエアロゾルと雪氷の効果のパラメタリゼーションを改良する新しいアルゴリズムが開発されたことで、地上からの紫外線観測値と平均的によく一致するようになった。TOMS はすでに利用できないが、衛星から導出される全球紫外線データの連続性は、Aura 衛星搭載の新しいオゾン監視装置（OMI）によって維持されている。
- ・ 雲は、オゾンの変化または他の要因による紫外線の長期変化の検出可能性を制限する主要因となっている。オゾンの変化傾向が線形であるとしても、紫外線の傾向を検出するには少なくとも 10~15 年の観測が必要であろう。極域以外のほとんどの場所では、オゾン破壊の紫外線への影響は相対的に小さく、雲の影響の方が大きい。
- ・ 大気汚染物質が、オゾン破壊による紫外線の増加を相殺するかもしれない。オゾン、二酸化窒素（NO₂）、二酸化硫黄（SO₂）など、下部対流圏の紫外線を吸収する大気汚染物質は紫外線を約 20%減衰させることが観測によって確認されている。この効果は大気汚染物質の放出源に近い場所でみられる。大気汚染は、全太陽放射に比べて紫外線をより大きく減衰させる。

2.8 オゾン層破壊係数と地球温暖化指数

- ・ 全球のオゾン破壊における（1 原子あたりの）塩素に対する臭素の効率は、一般に α で呼ばれるが、45 から 60 に上方修正された。3 つの独立した 2 次元モデルから計算された値は、使われたモデルと極短寿命の物質により成層圏に加えられた臭素の仮定量によって、57 から 73 までの範囲となる。

- ・ オゾン層破壊係数（ODP）が再評価された。その中で最も大きな修正は、 α 値の見積もりを改訂したことによる炭化臭素類の 33% 増加である。ハロン-1211 の ODP に対する 13% の過剰見積もりにつながった前回オゾンアセスメントでの計算誤差は修正された。
- ・ 直接及び間接地球温暖化指数（GWP）が更新された。直接 GWP はトリフルオロメチル五フッ化硫黄（ SF_5CF_3 ）と塩化メチル（ CH_3Cl ）の寿命の変化に加えて、HFC-134a、四フッ化炭素（ CF_4 ）、HFC-23、HFC-32、HFC-227ea 及び三フッ化窒素（ NF_3 ）の放射効果の変化により修正された。さらに、すべての化合物に対する直接 GWP は、様々な時間範囲の CO_2 絶対地球温暖化指数の僅かな減少に影響される。間接 GWP は、主に、前回のアセスメントと比べて今回のアセスメントでオゾン層破壊物質が 1980 年レベルに戻るタイミングが遅くなったことを反映するためと臭素の効率係数の増加を説明するために修正された。

3. 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、人間活動とオゾン層との相互作用について次第によりよ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一連のアセスメント報告を通じて、政策決定者にもたらされてきた。ここに要約した「オゾン層破壊に関する科学アセスメント 2006」の研究成果は、オゾン層保護に関わる行政、産業およびその他の政策決定のために必要な最新科学情報を直接提供する。

- ・ 人為起源のオゾン層破壊物質が過去数十年間のオゾン層破壊の主要因となっているという我々の基本的な理解は強められている。
- ・ モントリオール議定書は機能している。オゾン層破壊物質の大気中の負荷の減少の明らかな証拠及び成層圏オゾン層回復のいくつかの早期兆候がある。本総括要旨の中で以下の通り示した。
 - オゾン層破壊物質の量は、全部あわせると、大気下層で明らかに減少している。ほとんどすべての個々のオゾン層破壊物質の量も減少している。
 - 等価実効成層圏塩素 EESC (成層圏における臭素と塩素のオゾン破壊能力に関する標準化された指標) もまた減少し始めたことの明らかな兆候がある。
 - 過去 10 年間、全球のオゾン層の破壊は悪化していない。
 - いくつかの汚染されていない地点での観測により、1990 年代後半から、オゾンの増加に伴って、紫外線が減少していることが示されている。
- ・ 2002 年の異常に小さい南極オゾンホールは、過去 10 年間に観測されたものに比べ、面積が小さく、オゾン量のレベルが高いことにより特徴付けられた。これは、異常に激しい気象現象

（「大規模成層圏突然昇温」）によるもので、オゾン層破壊物質の変化によるものではなかった。2003年と2005年のオゾンホールは、1990年代前半以来観測されているように大規模な破壊を示した。南極域オゾンの大規模な破壊は、長寿命のオゾン層破壊物質の減少が緩やかであると予想されるため、少なくとも今後10～20年は観測される可能性がかなり高い。

- ・ 臭素は、全球オゾンの破壊において、1原子あたり塩素の約60倍の効果があると現在見積もられている。この値は、2002年のアセスメントで用いられた45倍という値より大きい。今までのアセスメントで使用されてきた準経験則により、このような臭素のオゾン破壊効果の増大は臭素化合物のオゾン層破壊係数(ODP)を増加させると評価された。
- ・ オゾン層破壊物質の影響からオゾン層が長期的に回復するには、21世紀のうちのかなりの期間がかかると予測され、前回アセスメント（2002年）の見積もりより遅れると予想される。回復過程の重要な指標は、塩素と臭素の総量(EESC)が1980年以前の値へと減少する時期である。
 - 中緯度でのEESCが1980年以前のレベルに戻る時期は、特段の例外がなく全球的にモントリオール議定書に従った場合（シナリオA1）、2049年と計算されている。これは前回アセスメント（2002年）の予想より約5年遅い。この予想される遅れの要因は、気候変動に関する政府間パネル／技術・経済アセスメントパネル（IPCC/TEAP）の「オゾン層と全球気候システムの保護に関する特別報告：ハイドロフルオロカーボンとパーフルオロカーボンに関する問題」（2005年）で報告されているように、(i)既存の設備や製品（貯蔵）に含まれているCFC-11とCFC-12の見積もりが最近増えたことに伴う放出量の増加及び(ii)今後生産の拡大が予想されるHCFC-22の放出量の増加である。
 - 南極域の極渦のEESCが1980年以前の状態に回復するのは2065年頃と算出され、中緯度のEESCが1980年以前の状態に回復する時期よりも15年以上遅い。この予想される遅い回復は、今までのアセスメントと違って、南極域下部成層圏で空気の滞留期間がより長いという認識によるもので、オゾン層破壊に有効なオゾン層破壊物質の量に影響する。南極域の極渦のEESCの評価は、今までのオゾンアセスメントで示されていなかった。
- ・ オゾン層の回復を早める可能性のある選択肢について評価が行われた。下の表は、全球の人為起源のオゾン層破壊物質の生産を2006年以降中止した場合、2006年末に現在の貯蔵からの放出が削除された場合、または、全球のオゾン層破壊物質の人為的放出を2006年以降中止した場合の、達成されうる改善の最大限の見積もりを示す。いくつかの選択肢で、下記に示した理由により、前回アセスメント時よりオゾン層の回復を早める大きな効果がある。

表1 以下の仮定で達成されうる、基本シナリオ (A1) に対する EESC の積算量の減少率

化合物または化合物群	A 列 2006 年以降の生産からの放出をすべて削除	B 列 2006 年末に存在する貯蔵からの放出をすべて削除	C 列 2006 年以降のすべての放出を削除
クロロフルオロカーボン類 (CFCs)	0.3	11	11
ハロン	0.5	14	14
四塩化炭素 (CCl ₄)	3	(a)	3
メチルクロロフォルム (CH ₃ CCl ₃)	0.2	(a)	0.2
ハイドロクロロフルオロカーボン類 (HCFCs)	12	4	16
臭化メチル (CH ₃ Br) (人為起源)	5	(a)	5

A 列は、2006 年以降に生産されるものからの放出をすべて仮定的に削除する場合

B 列は、2006 年末に存在する貯蔵からの放出をすべて仮定的に削除する場合 (捕集、破壊など)

C 列は、2006 年以降のすべての放出を仮定的に削除する場合で、A 列と B 列の和にほぼ等しい。

(a) : これらの化合物に対しては、貯蔵は不明確であるため、放出量は生産量と同等とする。

- 2007 年から 1980 年レベルに戻るまでに積算した、ハロンとフロンに関する EESC の減少率 (B 列に示す) は前回の報告よりも大きい。これは、気候変動に関する政府間パネル/技術・経済アセスメントパネル (IPCC/TEAP) の「オゾン層と全球気候システムの保護に関する特別報告：ハイドロフルオロカーボンとパーフルオロカーボンに関する問題」(2005 年) で見積もられた CFC-11、CFC-12 及びハロン 1211 の貯蔵量が、今までのアセスメントで示された値よりはるかに大きく、かつ信頼できる値である可能性が高いことによる。
 - A 列に示された HCFCs の EESC 積算量の減少率は、前回の報告より大きくなっている。これは、開発途上国で将来生産される HCFC-22 の見積もりがはるかに大きくなったためである。
 - A 列の臭化メチルに対する EESC 積算量の減少率は前回の報告よりも大きい。これは、前述した塩素原子と比較した臭素原子のオゾン破壊効率の上方修正によることのほかに、臭化メチル全体の放出量に占める人為的放出の割合の上方修正による。
 - EESC 積算量の減少率に加えて、これらのシナリオは、EESC が 1980 年以前の値に減少するまでの時間を短縮させることができる。2006 年以降のオゾン層破壊物質の総放出量の仮定的な削除 (C 列) により、この時間は 2049 年から 2034 年へと約 15 年短縮されるであろう。2006 年以降のオゾン層破壊物質の生産からの総放出量 (A 列) の仮定的削除はこの時間を 6 年縮め、2043 年とするであろう。
 - 臭化メチルの段階的廃止は、2003-2004 年の生産レベルの 30~40% のレベルで 2005 年と 2006 年の不可欠用途使用免除を認めつつ、先進国で 2005 年から効力を生じた。臭化メチルの不可欠用途および検疫・事前船積み (QPS) の 2 つの追加的な例外使用が考慮された。両方の場合の解析において、EESC は、2007 年から 1980 年のレベルに戻るまで 1980 年を超えるレベルについて積算されている。不可欠用途使用免除の量は QPS への臭化メチルの推定使用量と同等である。
- 2010 年または 2015 年の不可欠用途使用免除の中止に対して、臭化メチルの使用が 2006 年レベルで無期限に続けば、中緯度の EESC 積算量は、それぞれ 4.7% または 4.0% 増加するであろう。

- ▶ QPS 使用の臭化メチルの製造を現在のレベルで続け、2015 年に中止すれば、中緯度の EESC 積算量は、現在のレベルで製造を続けた場合と比べて 3.2%減少するであろう。
- ・ **モントリオール議定書の遵守に失敗すれば、オゾン層の回復が遅れるか、あるいは回復を妨げることになるかもしれない。** 使用免除の継続や拡張、QPS、中間生成物、原料貯蔵に関連した放出も回復を遅らせるかもしれない。
- ・ **成層圏オゾン破壊における極短寿命ハロゲン物質の役割は、今までの評価よりも、現在はより重要であると確信されている。** このような物質を人為的に大量に生産することがオゾン層破壊を促進させ得ることを示唆している。現在の理解では、この種の物質のオゾン層破壊係数は次の通りである。
 - n-臭化プロピルの熱帯域の放出に対するオゾン層破壊係数は 0.1、北半球中緯度に限定した放出に対しては 0.02-0.03 である。これらの値は前回のアセスメントから変わっていない。
 - 最新の解析では、CF₃I のオゾン層破壊係数の上限は、熱帯域の放出に対しては 0.018、中緯度の放出に対しては 0.011 となっている。前回のアセスメントでは上限は 0.008 であった。
 - 寿命が約 25 日で塩素原子を 1 個含み、CFC-11 と同等の分子量を持つ極短寿命の塩素系ソースガス類は、いかなるものでも約 0.003 のオゾン層破壊係数を持つ。
- ・ **オゾン層破壊と気候変動との関連性を理解することは、将来のオゾン量を見積もる上できわめて重要である。** オゾン層破壊物質及び代替物質の多くは温室効果ガスでもあり、オゾンの変化は気候に影響を与え、気候の変化はオゾンに影響を与える。これらの問題は、最近、気候変動に関する政府間パネル/技術・経済アセスメントパネル (IPCC/TEAP) の「オゾン層と全球気候システムの保護に関する特別報告：ハイドロフルオロカーボンとパーフルオロカーボンに関する問題」(2005 年)の主題となり、この 2006 年のオゾンアセスメントでもオゾン層破壊と気候変化との結びつきのいくつかの側面について検討がなされた。化学と気候との相互作用を組み込んだ 3 次元モデルが利用され始めたことは大きな前進である。