

## V IPCC/TEAP 特別報告

### オゾン層と全地球的気候システムの保護:ハイドロフルオロカーボン類とパーフルオロカーボン類に関する課題 政策決定者のための概要

#### 1. はじめに

IPCC/TEAP 特別報告は、「気候変動に関する国際連合枠組条約」(UNFCCC)と「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」の依頼に応じて、地球全体の気候システムに影響を与えるオゾン層破壊物質(ODS)の代替物質に関する科学的、技術的、政策関連のバランスのとれた報告書として作成された。本報告書は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)及びモントリオール議定書の技術・経済評価パネル(TEAP)によって作成された。

オゾン層破壊物質は成層圏のオゾン層破壊の原因となるため、モントリオール議定書の下で生産と消費が制限され、徐々に撤廃されつつある。これは、モントリオール議定書の締約国である先進国及び発展途上国双方の締約国の努力の成果である。オゾン層破壊物質とその代替物質は気候変動に影響を与える温室効果ガスでもある。(図 68 参照)。いくつかのオゾン層破壊物質の代替物質の中で、特にハイドロフルオロカーボン(HFC)とパーフルオロカーボン(PFC)はUNFCCC 及び京都議定書の対象となっている。オゾン層を保護するために採られた選択が気候変動に影響することも考えられる。また、気候変動が間接的にオゾン層に影響を与えることもある。

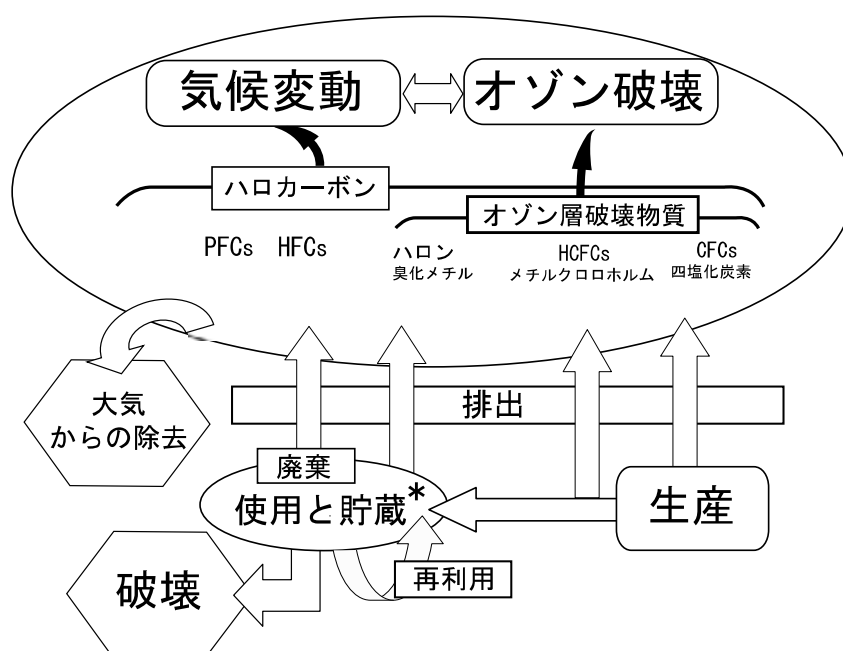


図 68 本報告書で扱う主要な問題の概念図

CFC、ハロンと HCFC はオゾン破壊と気候変動の原因となる。一方、HFC と PFC は気候変動のみの原因となり、オゾン層破壊物質の代替物質の一種である。ハロカーボンの排出量を減らすための選択肢として、本報告書で検討しているのは、副産物及び現存の貯蔵からの漏洩防止、回収、再利用、破壊、地球温暖化係数がより小さい又は無視できる代替のプロセスや物質の使用である。

\* 貯蔵 (bank) とは、既存の機器や備蓄、発泡その他の製品中に含まれ、未だ大気中に放出されていない全ての物質を指す。

本報告書においては、オゾン層破壊物質とその代替物質の排出全体が気候システムとオゾン層に与える影響について検討している。特に、代替オプションがどのように地球温暖化に影響を及ぼし得るかを理解するための内容となっている。ただし、本報告書はオゾン層に対する代替オプションの影響について包括的に取り扱おうとするものではない。

また、各部門が温室効果ガス削減に取り組むために必要な、ハロカーボンの排出削減オプション、代替物質に関するオプションやその技術についても検討している。HFCとPFCの排出については、オゾン層破壊物質の代替に関係する排出に関してのみ扱う。アルミニウムや半導体生産などの部門からのHFCやPFCの排出については扱わない。

オゾン層破壊物質とその代替物質である HFC と PFC の主な用途としては、冷凍冷蔵機器、エアコン、発泡体、エアロゾル、消火器、溶剤がある。これらの物質の排出は、製造及び製造時に生成される副産物の非意図的放出、意図的に排出する製品の使用、使用時の機器や製品からの蒸発・漏洩、試験及びメンテナンス、廃棄処理などに伴って起こる。

本報告書では、具体的な排出削減オプションの適用期間は 2015 年までとする。急激に成長している産業分野においては市場の潜在能力が高く、その期間においてのみ代替オプションに関する文献の信頼性は保証されるためである。技術性能、潜在的な評価手法、エネルギー使用に関連した温室効果ガスの間接的な排出のほか、費用、人の健康と安全性、大気質への影響、将来の利用可能性についても検討されている。

## 2 . ハロカーボン、オゾン層破壊、気候変動

### 2 . 1 過去及び現在におけるオゾン層破壊物質とその代替物質の地球の気候とオゾン層に与える影響は？

ハロカーボン、中でもオゾン層破壊物質は、直接放射強制力\*の増加とそれに関連した地球全体の平均表面温度の上昇の一因となった(図 69 参照)。1750 年から 2000 年までに工業的に生産されたオゾン層破壊物質とそれ以外のハロカーボンの増加による正の直接放射強制力の増加は  $0.34 \pm 0.03 \text{ Wm}^{-2}$  と推定される。これは、同期間によく混合された温室効果ガス全体の増加によるものの約 14%にあたる。ハロカーボン類の増加の大半は、最近数十年に起こったものである。大気中の CFC 濃度は、2001 年から 2003 年まで横ばいかもしくは減少傾向にある(CFC の種類により異なり、0 ~ -3%/年の変動率である)。一方、ハロンや代替物質である HCFC、HFC は増加した(それぞれ、1 ~ 3%/年、3 ~ 7%/年、13 ~ 17%/年)。

---

\* ある因子が地球 大気システムに出入りするエネルギーのバランスを変化させる影響力の尺度であり、気候を変化させる可能性の大きさを示す。1 平方メートル当たりのワット数 ( $\text{Wm}^{-2}$ ) で表される。放射強制力には直接効果と間接効果があり、前者は因子が日射・赤外放射を散乱・吸収することによる温暖化又は冷却効果であり、後者は因子が雲粒核となり雲を形成することによる温暖化又は冷却効果である。

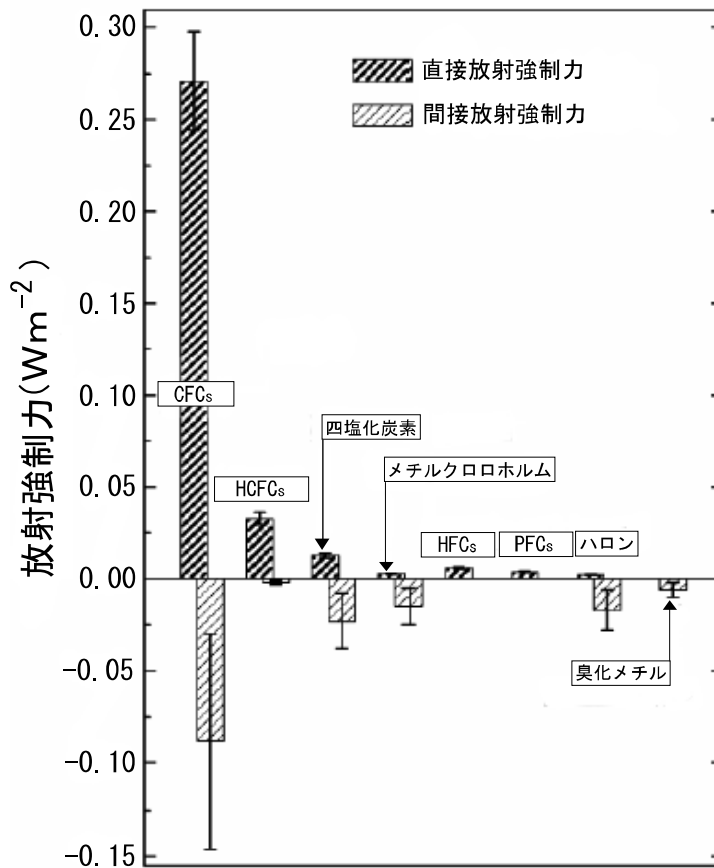


図 69 1750 年～2000 年のハロカーボン類の変化による直接及び間接放射強制力  
縦線は標準偏差の 2 倍を示す (  $\pm 2$  )。

1970 年から観測され始めた成層圏オゾン層の破壊は、ハロン、CFC、HCFC、メチルクロロホルム、四塩化炭素、臭化メチルなどの人為起源のオゾン層破壊物質の分解によって生成される反応性の塩素及び臭素の化合物の濃度上昇が主な原因である。

オゾン層が破壊されると、気候に対する負の放射強制力が生み出される。これは、オゾン層破壊物質の間接的な冷却効果である ( 図 69 参照 )。オゾン量の変化は、現在のところ地球全体で平均約  $-0.15 \pm 0.10 \text{ Wm}^{-2}$  の放射強制力を与えていると考えられている。主にオゾン層破壊の詳細な垂直分布がはっきりしないため、オゾン層破壊物質の間接放射強制力も非常に不確かである。この負の放射強制力は、オゾン層破壊物質自体による正の直接放射強制力 (  $0.33 \pm 0.03 \text{ Wm}^{-2}$  ) より小さいと思われる。

オゾン層破壊物質による温暖化とオゾン層破壊による冷却化は、2 つの異なる気候変動メカニズムであり、互いに単純に相殺されるものではない。オゾン層破壊による冷却効果の空間分布や季節変動は、温暖化効果のそれとは異なる。数少ない地球規模の気候モデリングと統計的な研究結果によると、オゾン層破壊は、両半球の対流圏の循環と気温にとって重要な気候の変動パターンに影響を与える 1 つのメカニズムと捉えられる。しかし、観測されたこれらの変動パターンの変化が、明確にオゾン層破壊に起因しているとは言いきれない。

各種ガスは、主にこれまでの排出量、温室効果ガスとしての効果、大気中の寿命、分子に含まれる塩素又は臭素原子の数などにより温暖化効果とオゾン破壊効果が異なる ( 図 69 参照 )。臭素を含むガスは、現在のところ温暖化効果よりも冷却効果に寄与している。一方、CFC と HCFC は冷却効果よりも温暖化効果に寄与している。HFC と PFC は温暖化にのみ寄与している。

## 2.2 オゾン層破壊物質の段階的撤廃は、気候変動およびオゾン層破壊への取組にどのような影響を与えたか？

モントリオール議定書の下での措置により、CFC は HCFC や HFC、その他の物質・製法へと代替された。代替ガスの地球温暖化係数 (GWP) は総じてより小さく、ハロカーボン類の総排出量が減少したため、直接的 GWP で重み付けされた CO<sub>2</sub> 換算での総排出量も減少してきた。大気観測結果によると、CFC、HCFC、HFC の CO<sub>2</sub> 換算排出量は、1990 年頃に年間約 7.5 ± 0.4Gt-CO<sub>2</sub> であったのが、2000 年頃には年間約 2.5 ± 0.2Gt-CO<sub>2</sub> へと減少した。これは、それぞれの年の地球全体の化石燃料の燃焼による CO<sub>2</sub> 排出量の約 33% と約 10% に相当する。成層圏の塩素濃度はほぼ横ばいであり、既に減少し始めている可能性もある。

ハロカーボン類の代替物質として用いられるアンモニアや炭化水素 (HC) の大気中での寿命は数日間から数ヶ月であり、代替物質としての使用により直接的、間接的放射強制力が地球全体の気候へ与える影響はごくわずかであると思われる。代替物質の利用に伴うエネルギー関連の排出の変化についても考慮する必要がある。

本報告書において開発された現状維持シナリオを基に算出した 2015 年の HFC の推定直接放射強制力は約 0.030Wm<sup>-2</sup> である。一方、IPCC の排出シナリオに関する特別報告 (SRES) におけるシナリオを基に算出した 2015 年における PFC の放射強制力は約 0.006Wm<sup>-2</sup> である。これらの HFC と PFC の放射強制力は、よく混合された温室効果ガス全体の 2015 年の推定放射強制力のそれぞれ約 1.0%、約 0.2% にあたり、一方、オゾン層破壊物質の寄与は約 10% である。本報告書は、特に 2015 年までの期間のシナリオに焦点をあてている。IPCC の SRES のシナリオでは 2015 年以降の期間についても検討されているが、再評価はされていない。SRES のシナリオでは、これから数十年の間に HFC からの放射強制力が大幅に増加すると予測しているが、技術の適用と政策に関して不確実性が大きいことから、その推定値自体も非常に不確かなものとなっている。

観測結果及びモデルによる算出結果によると、地球規模の平均的なオゾン層破壊量は、現在ほぼ安定化してきていることが示唆されている (図 70 参照)。オゾン層破壊が最も著しい極域も含め、オゾン量には今後もかなりの経年変動があると予想されるが、モントリオール議定書が完全に遵守された場合、オゾン層破壊物質の大気中濃度が減少することにより、今後数十年のうちにオゾン層は回復し始めると考えられる。

長期にわたって増加すると予想されるその他の温室効果ガスが、成層圏を冷却化し、また、成層圏の循環を変化させることにより、今後ますますオゾン層に影響を与えるだろう。冷却効果及びオゾン層破壊物質の大気中濃度の減少の結果として、成層圏の多くの場所でオゾン量の増加が予想されるが、北極域を含むいくつかの地域では減少する可能性がある。しかし、気候変動による大気循環の変化がもたらす影響はこれらの要因よりも大きいと予想され、また、大気中の温室効果ガス濃度の増加によるオゾン量への実質的影響は、現在のところ、その規模及び徴候の双方において不確かである。現在のモデルによると、近年南極域上空で観測されているものに類似の北極域でのオゾンホールは、高い確率で発生しないと考えられる。

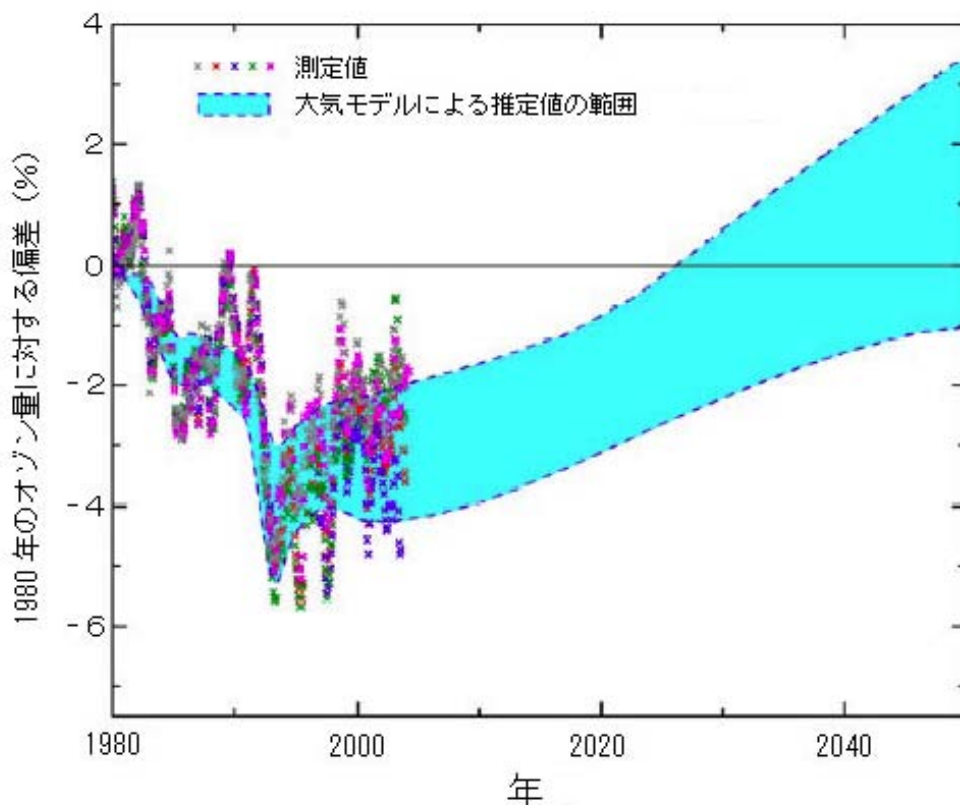


図 70 低中緯度(60°S 60°N)におけるオゾン量の比偏差の推移  
1980年のオゾン量に対する偏差を%で表す。×は観測値、点線の囲みは大気モデルによる推定値の範囲である。

CFC、HCFC、HFC、PFC 及びハロンの排出に伴う今後の相対的な温暖化及び冷却効果は、ガスの寿命、化学的性状及び排出の期間によって異なる（表 10 参照）。HFC と HCFC の大気中寿命は約 1 年から 20 年の範囲であり、いくつかの HFC やほとんどのハロン及び CFC は数十年から数世紀にわたる。また、PFC は 1,000 年から 50,000 年である。ハロカーボン類の直接的 GWP は 5 から 10,000 の範囲に及ぶ。オゾン層破壊物質による間接的な冷却化はオゾン層の回復により停止すると予想されるため、間接的な冷却効果に関する GWP は、排出の年やモントリオール議定書の遵守、ガスの寿命に依存する。このため、間接的な GWP は直接的な GWP よりもより不確実である傾向にある。

表 10 ハロカーボン類の GWP

ガス	直接的放射強制力によるGWP <sup>a</sup>	間接的放射強制力によるGWP <sup>b</sup> (2005年の排出)	寿命 (年)	UNFCCCの 報告 <sup>c</sup> GWP
<i>CFCs</i>				
CFC-12	10,720 ± 3750	-1920 ± 1630	100	n.a. <sup>d</sup>
CFC-114	9880 ± 3460	n.a.	300	n.a. <sup>d</sup>
CFC-115	7250 ± 2540	n.a.	1700	n.a. <sup>d</sup>
CFC-113	6030 ± 2110	-2250 ± 1890	85	n.a. <sup>d</sup>
CFC-11	4680 ± 1640	-3420 ± 2710	45	n.a. <sup>d</sup>
<i>HCFCs</i>				
HCFC-142b	2270 ± 800	-337 ± 237	17.9	n.a. <sup>d</sup>
HCFC-22	1780 ± 620	-269 ± 183	12	n.a. <sup>d</sup>
HCFC-141b	713 ± 250	-631 ± 424	9.3	n.a. <sup>d</sup>
HCFC-124	599 ± 210	-114 ± 76	5.8	n.a. <sup>d</sup>
HCFC-225cb	586 ± 205	-148 ± 98	5.8	n.a. <sup>d</sup>
HCFC-225ca	120 ± 42	-91 ± 60	1.9	n.a. <sup>d</sup>
HCFC-123	76 ± 27	-82 ± 55	1.3	n.a. <sup>d</sup>
<i>HFCs</i>				
HFC-23	14,310 ± 5000	~0	270	11,700
HFC-143a	4400 ± 1540	~0	52	3800
HFC-125	3450 ± 1210	~0	29	2800
HFC-227ea	3140 ± 1100	~0	34.2	2900
HFC-43-10mee	1610 ± 560	~0	15.9	1300
HFC-134a	1410 ± 490	~0	14	1300
HFC-245fa	1020 ± 360	~0	7.6	- <sup>e</sup>
HFC-365mfc	782 ± 270	~0	8.6	- <sup>e</sup>
HFC-32	670 ± 240	~0	4.9	650
HFC-152a	122 ± 43	~0	1.4	140
<i>PFCs</i>				
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	12,010 ± 4200	~0	10,000	9200
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	9140 ± 3200	~0	3200	7400
CF <sub>4</sub>	5820 ± 2040	~0	50,000	6500
<i>ハロン</i>				
ハロン-1301	7030 ± 2460	-32,900 ± 27,100	65	n.a. <sup>d</sup>
ハロン-1211	1860 ± 650	-28,200 ± 19,600	16	n.a. <sup>d</sup>
ハロン-2402	1620 ± 570	-43,100 ± 30,800	20	n.a. <sup>d</sup>
<i>その他のハロカーボン</i>				
四塩化炭素(CCl <sub>4</sub> )	1380 ± 480	-3330 ± 2460	26	n.a. <sup>d</sup>
メチルクロロホルム (CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	144 ± 50	-610 ± 407	5.0	n.a. <sup>d</sup>
臭化メチル(CH <sub>3</sub> Br)	5 ± 2	-1610 ± 1070	0.7	n.a. <sup>d</sup>

n.a. = not available (該当なし)

一般にモントリオール議定書やUNFCCC及び京都議定書において報告され、本報告書において評価されているハロカーボン類のGWPは、UNFCCCの下で報告に使用される大気中寿命とGWPを用い、100年の評価期間におけるCO<sub>2</sub>に対する相対値として示されている。濃い灰色で示すガスはモントリオール議定書の対象物質であり、薄い灰色で示すガスはUNFCCCの対象物質である。

- a 直接的な正の放射強制力によるGWPの不確実性は±35%である(標準偏差の(±2)2倍)(IPCC, 2001)。  
b 間接的な負の放射強制力によるGWPの不確実性には、オゾン層破壊による負の放射強制力の不確実性だけでなく、オゾン層の回復までに要する時間の不確実性も考慮されている。  
c UNFCCCの報告ガイドラインはIPCC第2次評価報告書のGWP値を使用している(FCCC/SBSTA/2004/8, <http://unfccc.int/resource/docs/2004/sbsta/08.pdf>参照)。  
d オゾン層破壊物質はUNFCCCの対象ではない。  
e IPCC第2次評価報告書にはHFC-245fa及びHFC-365mfcのGWP値は含まれていない。しかし、UNFCCCの報告ガイドラインにはすべての温室効果ガスからの排出量報告に関する規定が含まれているため、IPCCによって評価されたGWP値が存在する。

### 2.3 大気圏化学に関連する大気質及びその他の環境問題に対して、オゾン層破壊物質の代替化はどのような影響をもたらすか？

エアコン、冷凍冷蔵機器や発泡吹きつけに使用される HFC、PFC や炭化水素などその他のガスによるオゾン層破壊物質の代替化は、地球規模の対流圏の化学に大きな影響があるとは考えられていない。しかし、大気質にとって小さいが無視できない影響が、局所的な排出源の近くで発生する可能性があり、例えば、現在その地域における基準に適合していない場所では、そのような影響が問題となり得る。

HFC 及び HCFC の難分解性生成物（例えばトリフルオロ酢酸（TFA））は、堆積・洗浄過程を通して大気中から除去される。しかし、既存の環境リスク評価及びモニタリング研究によると、これらの環境中の濃度が生態系に著しい影響を引き起こす濃度には至らないと考えられている。海水中の TFA の測定結果によると、TFA の自然発生源は十分に確認されてはいないものの、TFA の人為発生源は自然のそれよりも小さいことが指摘されている。