

第4部 卷末資料

1. オゾン層保護対策

1-1. オゾン層破壊物質等の概要

(1) 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対象のオゾン層破壊物質（特定物質）

モントリオール議定書	物質名	化学式	オゾン破壊係数		地球温暖化係数	
			モントリオール議定書附属書	2006年科学評価パネル	第4次IPCC報告書(100年GWP値**)	
附属書A	グループI (クロロフルオロカーボン)	CFC-11	CFCl ₃	1	1	4,750
		CFC-12	CF ₂ Cl ₂	1	1	10,900
		CFC-113	C ₂ F ₃ Cl ₃	0.8	1	6,130
		CFC-114	C ₂ F ₄ Cl ₂	1	1	10,000
		CFC-115	C ₂ F ₅ Cl	0.6	0.44	7,370
	グループII (ハロン)	ハロン-1211	CF ₂ BrCl	3	7.1	1,890
	ハロン-1301	CF ₃ Br	10	16	7,140	
	ハロン-2402	C ₂ F ₄ Br ₂	6	11.5	1,640	
附属書B	グループI (その他のCFC)	CFC-13	CF ₃ Cl	1	-	14,400
		CFC-111	C ₂ FCl ₅	1	-	-
		CFC-112 等10物質	C ₂ F ₂ Cl ₄	1	-	-
グループII	四塩化炭素	CCl ₄	1.1	0.73	1,400	
グループIII	1,1,1-トリクロロエタン	CH ₃ CCl ₃	0.1	0.12	146	
附属書C	グループI (ハイドロクロロフルオロカーボン)	HCFC-21	CHFC ₂	0.04	-	-
		HCFC-22	CHF ₂ Cl	0.055	0.05	1,810
		HCFC-123	C ₂ HF ₃ Cl ₂	0.02-0.06	0.02*	77
		HCFC-124	C ₂ HF ₄ Cl	0.02-0.04	0.02*	609
		HCFC-133	C ₂ H ₂ F ₃ Cl	0.02-0.06	-	-
		HCFC-141b	CH ₃ CFCl ₂	0.11	0.12	725
		HCFC-142b	CH ₃ CF ₂ Cl	0.065	0.07	2,310
		HCFC-225ca	CF ₃ CF ₂ CHCl ₂	0.025	0.02	122
		HCFC-225cb 等40物質	CF ₂ ClCF ₂ CHClF 他	0.033 他	0.03	595
	グループII (ハイドロプロモフルオロカーボン)	HBFC-22B1 等34物質	CHF ₂ Br 他	0.74 他	-	-
グループIII	プロモクロロメタン	CH ₂ BrCl	0.12	-	-	
附属書E	臭化メチル	CH ₃ Br	0.6	0.51	5	

* 複数の化合物のうち、一部の異性体に限る。

** 「100年GWP値」とは、対象となる物質の影響を100年間にわたって積分した値である。積分する年数（他に20年値や500年値などがある）によってGWP値は変化することがある。

(2) 気候変動枠組み条約に基づく京都議定書における削減対象の代替フロン等

京 都 議 定 書	物 質 名	化 学 式	オゾン層破壊係数	地球温暖化係数*	
				第2次IPCC報告書 (100年GWP値)	第4次IPCC報告書 (100年GWP値)
ハイドロフルオロカーボン (HFC)	HFC-23	CHF ₃	0	11,700	14,800
	HFC-32	CH ₂ F ₂	0	650	675
	HFC-41	CH ₃ F	0	150	-
	HFC-125	CHF ₂ CF ₃	0	2,800	3,500
	HFC-134	CHF ₂ CHF ₂	0	1,000	-
	HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	0	1,300	1,430
	HFC-143	CH ₂ FCHF ₂	0	300	-
	HFC-143a	CH ₃ CF ₃	0	3,800	4,470
	HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	0	140	124
	HFC-227ea	CF ₃ CHF ₂ CF ₃	0	2,900	3,220
	HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	0	6,300	9,810
	HFC-245ca	CH ₂ FCF ₂ CHF ₂	0	560	-
	HFC-43-10mee 等	CF ₃ CHFCH ₂ CF ₂ CF ₃	0	1,300	1,640
	パーフルオロカーボン (PFC)	PFC-14	CF ₄	0	6,500
PFC-116		C ₂ F ₆	0	9,200	12,200
PFC-218		C ₃ F ₈	0	7,000	8,830
PFC-318		c-C ₄ F ₈	0	8,700	10,300
PFC-3-1-10		C ₄ F ₁₀	0	7,000	8,860
PFC-4-1-12		C ₅ F ₁₂	0	7,500	9,160
PFC-5-1-14		C ₆ F ₁₄	0	7,400	9,300
等					
六フッ化硫黄	六フッ化硫黄	SF ₆	0	23,900	22,800

* 地球温暖化対策の推進に関する法律では、地球温暖化係数として第2次IPCC報告書の100年GWP値を採用している。

(3) 第4次 IPCC 報告書で地球温暖化係数が報告された温室効果ガス

(第2次 IPCC 報告書で地球温暖化係数が報告されたものを除く)

第4次IPCC報告書	物質名	化学式	地球温暖化係数 第4次IPCC報告書 (100年GWP値)
ハイドロフルオロカーボン (HFC)	HFC-245fa	$\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	1,030
	HFC-365mfc	$\text{CH}_3\text{CF}_2\text{CHF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	794
パーフルオロ化合物	NF ₃	NF_3	17,200
	PFC-9-1-18	$\text{C}_{10}\text{F}_{18}$	>7,500
	トリフルオロメチルサルファールヘンタフルオライド ³⁾	SF_5CF_3	17,700
フルオロエーテル	HFE-125	CHF_2OCF_3	14,900
	HFE-134	$\text{CHF}_2\text{OCHF}_2$	6,320
	HFE-143a	CH_3OCF_3	756
	HCFE-235da2	$\text{CHF}_2\text{OCHClCF}_3$	350
	HFE-245cb2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CHF}_2$	708
	HFE-245fa2	$\text{CHF}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$	659
	HFE-254cb2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CHF}_2$	359
	HFE-347mcc3	$\text{CHF}_2\text{CF}_2\text{OCH}_2\text{CF}_3$	575
	HFE-347pcf2	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	580
	HFE-356pcc3	$\text{CH}_3\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{CHF}_2$	110
	HFE-449ssl	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OCH}_3$	297
	HFE-569sf2	$\text{C}_4\text{F}_9\text{OC}_2\text{H}_5$	59
	HFE-43-10pccc124	$\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OC}_2\text{F}_4\text{OCHF}_2$	1,870
	HFE-236ca12	$\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{OCHF}_2$	2,800
HFE-338pcc13	$\text{CHF}_2\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{OCHF}_2$	1,500	
パーフルオロポリエーテル	PFPME	$\text{CF}_3\text{OCF}(\text{CF}_3)\text{CF}_2\text{OCF}_2\text{OCF}_3$	10,300
ハイドロカーボン等	ジメチルエーテル	CH_3OCH_3	1
	メチレンクロライド	CH_2Cl_2	8.7
	メチルクロライド	CH_3Cl	13

1-2. オゾン層保護対策の経緯

1974年	6月	米国カリフォルニア大学ローランド教授及びモリーナ博士がCFCによるオゾン層の破壊及びその結果として人や生態系への影響が生じる可能性を指摘した論文を発表
1985年	3月	「オゾン層の保護のためのウィーン条約」を採択
	12月	英国のファーマン博士らが南極上空のオゾン減少について報告
1987年	9月	「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」を採択
1988年	5月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律」（オゾン層保護法）制定・施行
	9月	ウィーン条約発効 日本、ウィーン条約及びモントリオール議定書に加入
	12月	ウィーン条約、日本について発効
1989年	1月	モントリオール議定書発効 モントリオール議定書、日本について発効
	5月	ウィーン条約第1回締約国会議及びモントリオール議定書第1回締約国会合開催（ヘルシンキ）
1990年	6月	モントリオール議定書第2回締約国会合開催（ロンドン） 特定フロン ²²² の2000年全廃、1,1,1-トリクロロエタンの規制物質への追加等を内容とする議定書の改正等を合意
1991年	3月	オゾン層保護法の一部改正
	6月	ウィーン条約第2回締約国会議及びモントリオール議定書第3回締約国会合開催（ナイロビ）
	9月	日本、改正モントリオール議定書（1990年改正）を受諾
1992年	8月	改正モントリオール議定書（1990年改正）、日本について発効 改正オゾン層保護法（1991年改正）施行
	11月	モントリオール議定書第4回締約国会合開催（コペンハーゲン） CFCの1996年全廃、HCFC、臭化メチルの規制物質への追加等を内容とする議定書の改正等を合意
1993年	11月	ウィーン条約第3回締約国会議及びモントリオール議定書第5回締約国会合開催（バンコク）
1994年	6月	オゾン層保護法の一部改正
	9月	改正オゾン層保護法（1994年改正）施行
	10月	モントリオール議定書第6回締約国会合開催（ナイロビ）
	12月	日本、改正モントリオール議定書（1992年改正）を受諾
1995年	3月	改正モントリオール議定書（1992年改正）、日本について発効
	6月	CFC等の回収・再利用・破壊の促進方策を取りまとめ（オゾン層保護対策推進会議）
	12月	モントリオール議定書第7回締約国会合開催（ウィーン） HCFCの2020年以降の消費を既設機器の整備用に限定、臭化メチルの2010年全廃、途上国に対する規制スケジュールの設定を内容とする議定書の調整等を合意
1996年	5月	「CFC破壊処理ガイドライン」を公表（環境庁）
	11月	ウィーン条約第4回締約国会議及びモントリオール議定書第8回締約国会合開催（コスタリカ・サンホセ）

1997年	9月	モントリオール議定書第9回締約国会合開催（モントリオール） 臭化メチルの削減計画の前倒し、臭化メチルの非締約国との貿易の禁止、不法取引防止のためのライセンスシステムの導入などを合意
		CFC等の回収・再利用・破壊の促進方策をとりまとめ（オゾン層保護対策推進会議）
1998年	6月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律第3条第1項の規定に基づく同項第1号から第3号に掲げる事項」（告示）の一部改正 「特定家庭用機器再商品化法」（家電リサイクル法）制定（家電製品からの冷媒フロン回収）
	11月	モントリオール議定書第10回締約国会合開催（カイロ）
1999年	3月	「CFC破壊処理ガイドライン」を改訂（環境庁）
	12月	ウィーン条約第5回締約国会議及びモントリオール議定書第11回締約国会合開催（北京） HCFCの生産量規制導入などを合意
		「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律施行令」（政令）の一部改正
2000年	7月	「フロン回収の手引き」を公表（環境庁） 「国家ハロンマネジメント戦略」をUNEPに提出（環境庁他）
	12月	モントリオール議定書第12回締約国会合開催（ブルキナファソ・ワガドゥグ）
2001年	3月	家電リサイクル法施行
	6月	「特定製品に係るフロン類の回収及び破壊の実施の確保等に関する法律」（フロン回収・破壊法）制定
	7月	「国家CFC管理戦略」をUNEPに提出（環境省他）
	11月	モントリオール議定書第13回締約国会合開催（コロンボ）
2002年	4月	フロン回収・破壊法（業務用冷凍空調機器からのフロン回収破壊）施行
	7月	日本、改正モントリオール議定書（1997年/1999年改正）を受諾 「使用済自動車の再資源化等に関する法律」（自動車リサイクル法）制定、フロン回収・破壊法の一部改正
	9月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律施行令」（政令）の一部改正
	10月	フロン回収・破壊法（カーエアコンからのフロン回収破壊）施行
	11月	ウィーン条約第6回締約国会議及びモントリオール議定書第14回締約国会合開催（ローマ）
2003年	1月	「特定家庭用機器再商品化法施行令」（政令）の一部改正（家電製品からの断熱材フロン回収）
	11月	モントリオール議定書第15回締約国会合開催（ナイロビ）
2004年	3月	モントリオール議定書第1回特別締約国会合開催（モントリオール）
	11月	モントリオール議定書第16回締約国会合開催（プラハ）
	12月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律施行令」（政令）の一部改正
2005年	1月	自動車リサイクル法全面施行（自動車リサイクルシステムの本格稼働）
	7月	モントリオール議定書第2回特別締約国会合（モントリオール）
	12月	ウィーン条約第7回締約国会議及びモントリオール議定書第17回締約国会合開催（ダカール）
2006年	1月	「臭化メチルの不可欠用途全廃のための国家管理戦略」をUNEPに提出（環境省・農林水産省）
	5月	「ハロン破壊処理ガイドライン」を公表（環境省）
	6月	フロン回収・破壊法の一部改正（業務用冷凍空調機器からのフロン回収強化）

2006年	10月	モントリオール議定書第18回締約国会合開催（デリー）
2007年	6月	「モントリオール議定書が直面する主要な将来課題に関する対話」会合（ナイロビ）
	9月	モントリオール議定書第19回締約国会合開催（モントリオール） HCFCの規制スケジュールの前倒しを合意
	10月	改正フロン回収・破壊法施行（業務用冷凍空調機器からのフロン回収強化）
	12月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律施行令」（政令）の一部改正
2008年	4月	「臭化メチルの不可欠用途全廃のための国家管理戦略」改訂版を UNEP に提出（農林水産省）
	5月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律第3条第1項の規定に基づく同項第1号から第3号に掲げる事項」（告示）の一部改正
	11月	ウィーン条約第8回締約国会議及びモントリオール議定書第20回締約国会合開催（ドーハ）
2009年	11月	モントリオール議定書第21回締約国会合開催（エジプト・ポートガーリブ）

1-3. 国際的なオゾン層保護対策

(1) オゾン層保護のためのウィーン条約

オゾン層保護のためのウィーン条約は、オゾン層保護のための国際的な枠組を定めた条約であり、1985年に採択された。我が国は1988年9月30日に加入。2010年7月現在で締約国数は195カ国及びEUである。

本条約においては、締約国が、

- ・ オゾン層の変化により生ずる悪影響から人の健康及び環境を保護するために適当な措置をとること（第2条第1項）
- ・ 研究及び組織的観測等に協力すること（第3条）
- ・ 法律、科学、技術等に関する情報を交換すること（第4条）

等について規定している。

(2) 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

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は、ウィーン条約に基づきオゾン層破壊物質の削減スケジュール等の具体的な規制措置等を定めた議定書であり、1987年に採択された。モントリオール議定書の採択後、オゾン層の破壊が予想以上に進んでいることが判明したこと等から、以後、1990年（ロンドン改正）、1992年（コペンハーゲン改正）、1995年（ウィーン調整）、1997年（モントリオール改正）、1999年（北京改正）及び2007年（モントリオール調整）の6回にわたって改正・調整された。2010年7月現在で締約国数は195カ国及びEUである。

本議定書においては、

- ・ 各オゾン層破壊物質の生産量・消費量の削減スケジュールの設定（第2条のA~H）
- ・ 非締約国との貿易の規制（規制物質の輸出入の禁止又は制限等）（第4条）
- ・ 最新の科学、環境、技術及び経済に関する情報に基づく規制措置の評価及び再検討（第6条）

等について規定している。

各オゾン層破壊物質の生産量・消費量の削減スケジュールを図4-1に示す。

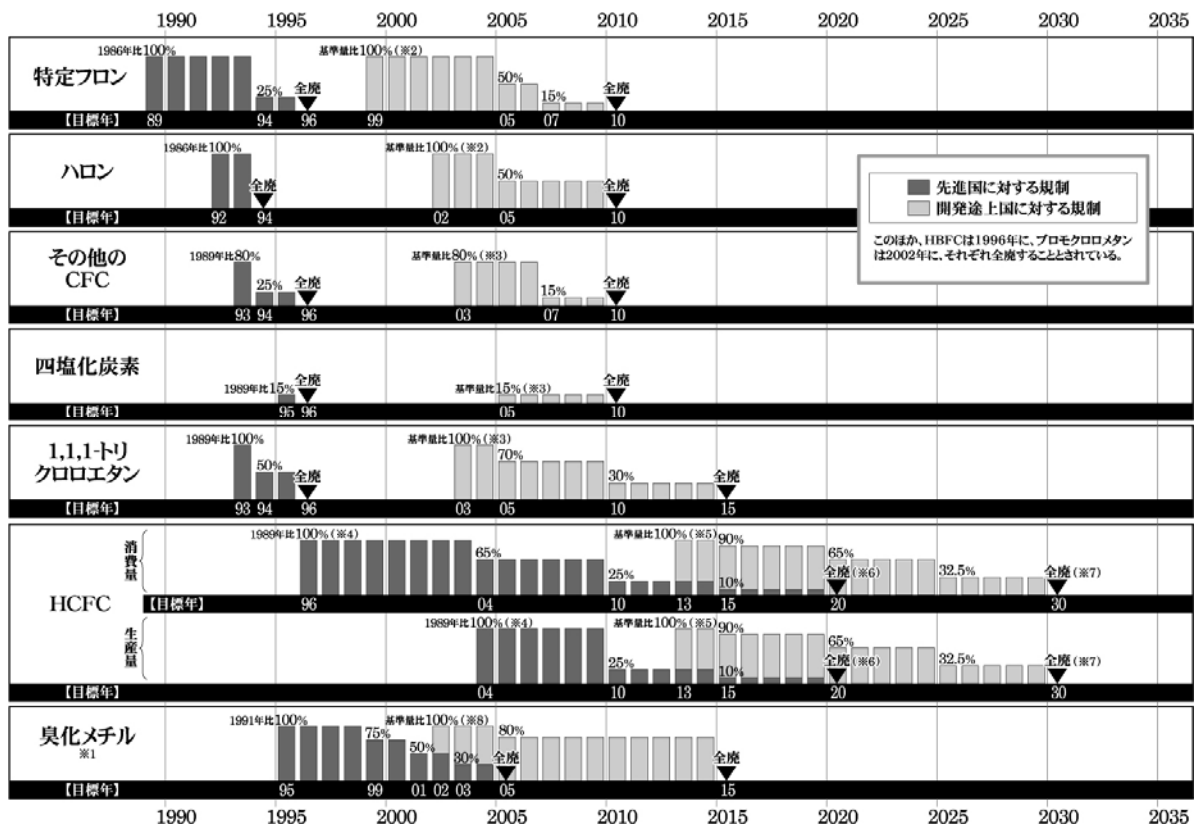


図 4-1 モントリオール議定書に基づく段階的削減スケジュール

各物質のグループ毎に、生産量及び消費量（＝生産量＋輸入量－輸出量）が削減される。

※1) 検疫及び出荷前処理用として使用される臭化メチルは、規制対象外となっている。

※2) 基準量は、1995年から1997年までの生産量・消費量の平均値又は生産量・消費量が一人当たり0.3キログラムとなる値のいずれか低い値。

※3) 基準量は、1998年から2000年までの生産量・消費量の平均値又は生産量・消費量が一人当たり0.2キログラムとなる値のいずれか低い値。

※4) 消費量の基準量は、HCFCの1989年消費量＋CFCの1989年消費量×2.8%。生産量の基準量は、HCFCの1989年生産量と消費量の平均値＋CFCの1989年生産量と消費量の平均値×2.8%。

※5) 基準量は、2009年と2010年の生産量・消費量の平均値。

※6) ただし、2030年までの間、冷凍空調機器の補充用冷媒に限り、生産量・消費量の基準量の0.5%を上限に生産・消費することができる。

※7) ただし、2040年までの間、冷凍空調機器の補充用冷媒に限り、平均として生産量・消費量の基準量の2.5%を上限に生産・消費することができる。

※8) 基準量は、1995年から1998年までの生産量・消費量の平均値。

**途上国の基礎的な需要を満たすための追加生産が認められているほか、生産が全廃になった物質でも試験研究・分析や必要不可欠な用途についての生産等は規制対象外となっている。

(3) 世界におけるオゾン層破壊物質の生産量・消費量の削減実績

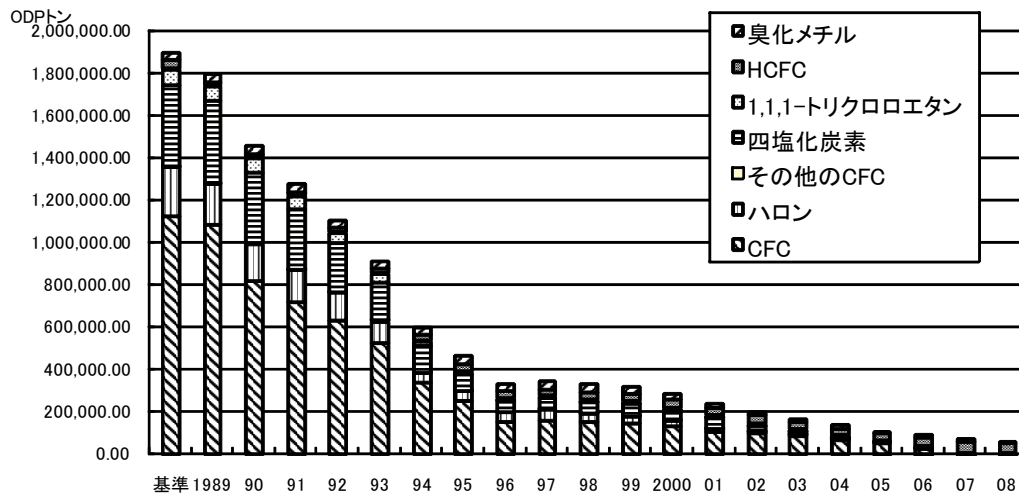


図 4-2 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の生産量の推移 (1989～2008年)
ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完 (HCFC を除く) し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完 (先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完)。単位は ODP トン。

(出典) UNEP オゾン事務局ウェブサイト

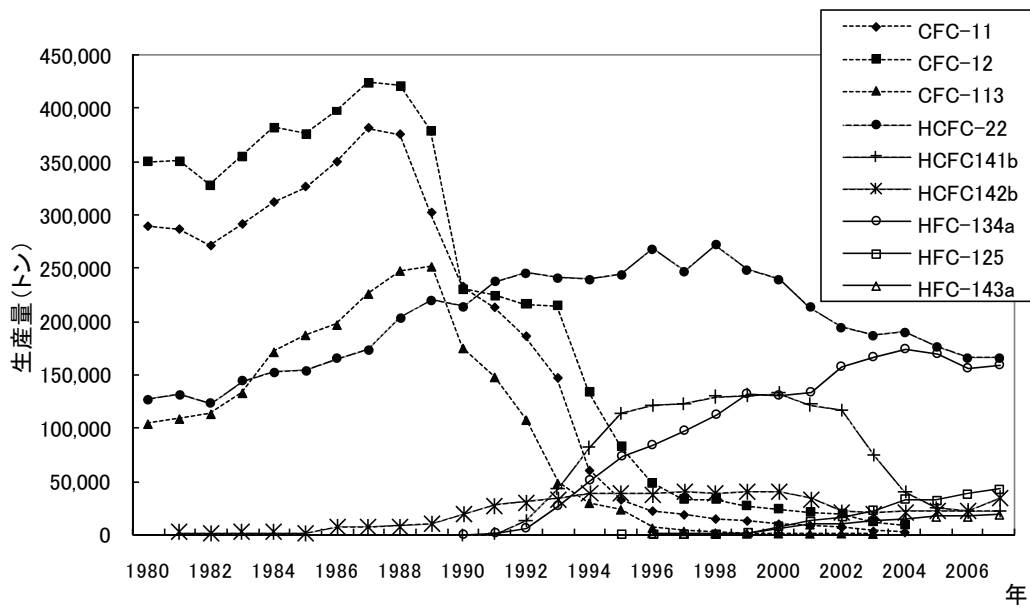


図 4-3 主要なフロン年別生産量の推移 (1980～2007年)

集計は AFEAS に登録のあったデータのみ。単位は重量トン。

(出典) The Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS) ウェブサイト

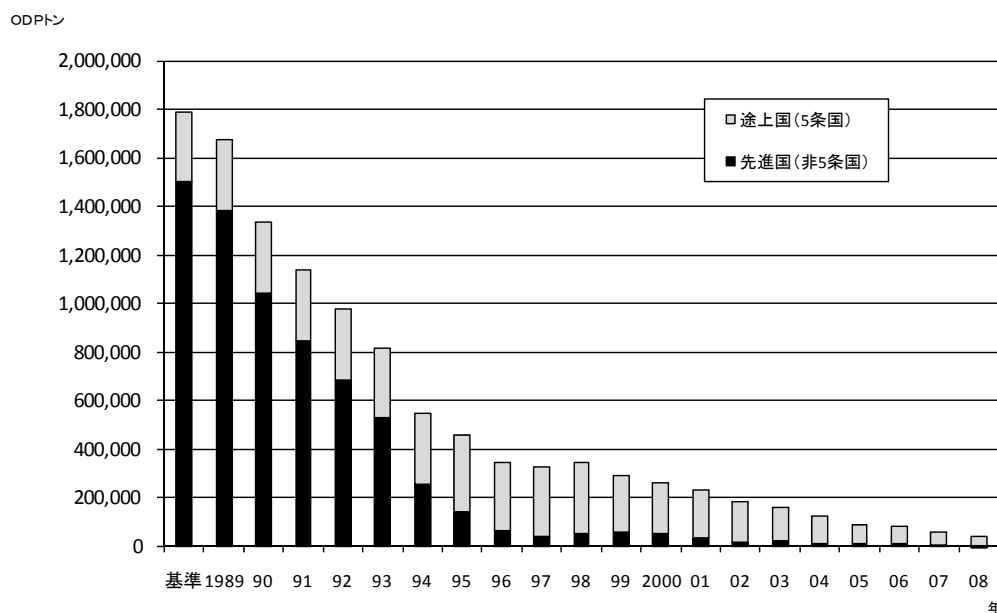


図 4-4 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の消費量の推移（1989～2008年）
 ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完（HCFC を除く）し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完（先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完）。単位は ODP トン。
 （出典） UNEP オゾン事務局ウェブサイト

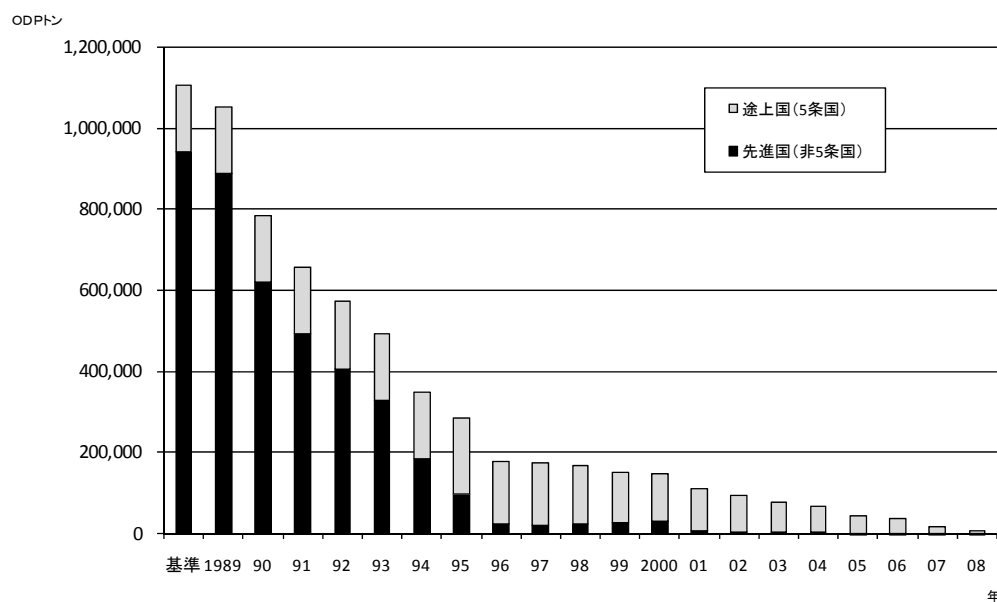


図 4-5 モントリオール議定書に基づく CFC（附属書 A グループ I）の消費量の推移（1989～2008年）

ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完。単位は ODP トン。
 （出典） UNEP オゾン事務局ウェブサイト

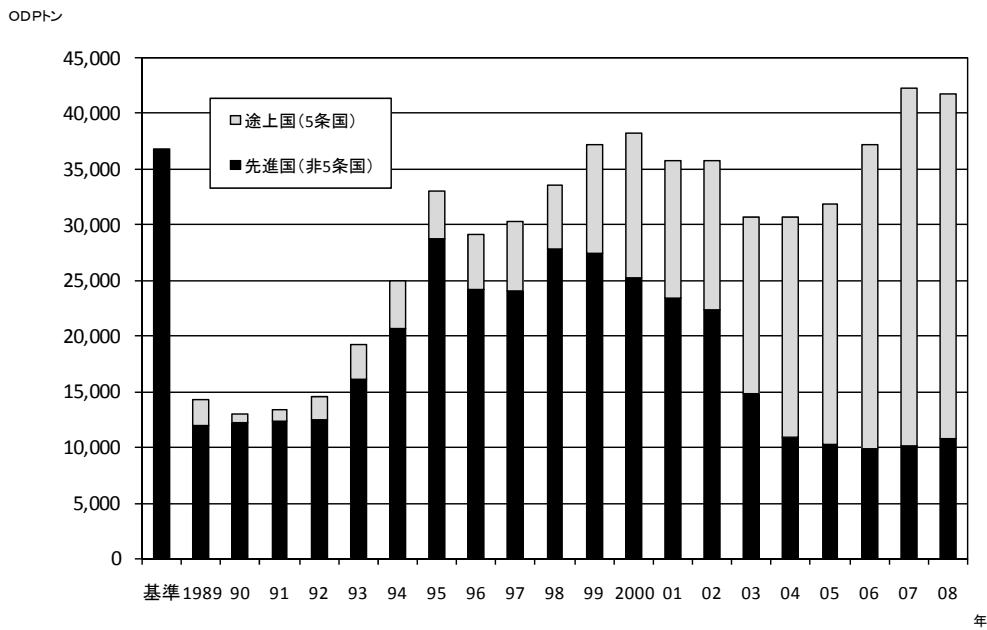


図 4-6 モントリオール議定書に基づく HCFC の消費量の推移 (1989~2008 年)
 ただし、先進国における 1990 年・1991 年のデータは一定の割合で変化するものとして補完。単位は ODP トン。
 (出典) UNEP オゾン事務局ウェブサイト

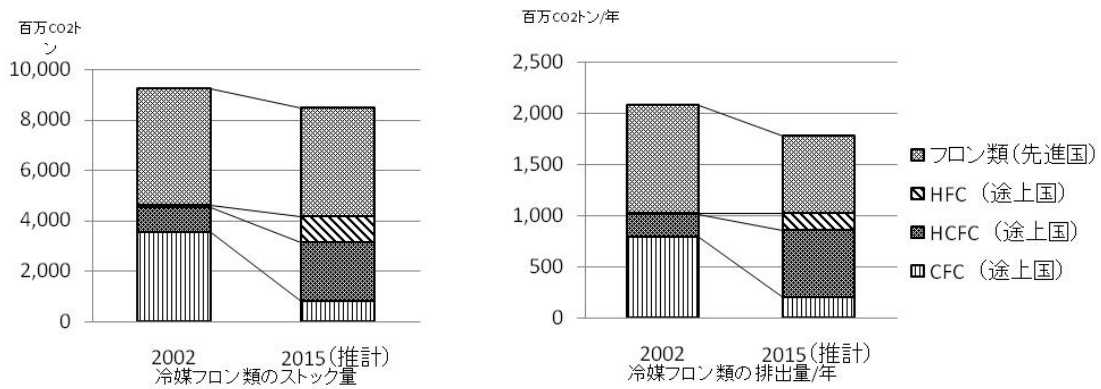


図 4-7 冷媒フロン類のストック量及び排出量/年 (2002 年・2015 年 (推計))
 単位は CO2 換算トン。
 (出典) IPCC/TEAP 特別報告

1-4. 我が国におけるオゾン層保護対策

(1) オゾン層破壊物質の生産・消費の規制

我が国では、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締結にあたり、昭和63年に「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律（オゾン層保護法）」を制定し、平成元年7月からオゾン層破壊物質の生産・輸出入の規制を開始し、モントリオール議定書の義務を着実に履行している。生産量・消費量の削減実績については次ページ参照。

我が国における特定物質（オゾン層破壊物質）の生産量・消費量に関する基準限度

・CFC（議定書附属書AグループI）

期間	生産量	消費量
1993年1月1日～	119,998	118,134
1994年1月1日～	30,000	29,534
1996年1月1日～	0	0

・ハロン

期間	生産量	消費量
1993年1月1日～	28,419	16,958
1994年1月1日～	0	0

・その他のCFC（議定書附属書BグループI）

期間	生産量	消費量
1993年1月1日～	1,874	1,865
1994年1月1日～	586	583
1996年1月1日～	0	0

・四塩化炭素

期間	生産量	消費量
1995年1月1日～	2,940	11,232
1996年1月1日～	0	0

・1,1,1-トリクロロエタン

期間	生産量	消費量
1993年1月1日～	15,637	17,279
1994年1月1日～	7,819	8,640
1996年1月1日～	0	0

・HCFC

期間	生産量	消費量
1996年1月1日～	-	5,562
2004年1月1日～	5,654	3,615
2010年1月1日～	1,413	1,390
2015年1月1日～	565	556
2020年1月1日～ ^(注)	28	27
2030年1月1日～	0	0

(注)2020年1月1日に存在する冷凍空調機器への補充に限る。

・臭化メチル

期間	生産量	消費量
1995年1月1日～	3,376	3,664
1999年1月1日～	2,532	2,748
2001年1月1日～	1,688	1,832
2003年1月1日～	1,012	1,099
2005年1月1日～	0	0

①日本における特定物質の生産量・消費量の推移

表 4-1 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 A）

（単位：ODP トン*）

年次 ⁽¹⁾	特定フロン		ハロン	
	生産量	消費量**	生産量	消費量
基準年 (1986年)	119,998	118,134	28,419	16,958
1989年	119,070	109,916	-	-
1990年	101,288	89,056	-	-
1991年	109,531	97,989	-	-
1992年			20,140	14,786
1993年	51,212	47,435	9,288	7,527
1994年	28,392	26,455	0	0
1995年	24,267	23,062	0	0
1996年	786	-352	0	-2
1997年	166	-173	0	0
1998年	0	-312	0	0
1999年	0	-21	0	0
2000年	0	0	0	0
2001年	0	0	0	0
2002年	0	0	0	0
2003年	0	0	0	0
2004年	0	0	0	0
2005年	0	0	0	0
2006年	0	0	0	0
2007年	0	-5	0	0
2008年	0	-1	0	0

(1) 特定フロンの1989年及び1990年に関しては、各年の7月から翌年6月まで、1991年は7月から1992年12月までの18ヶ月間の値。その他に関しては、各年の1月から12月までの値となっている。

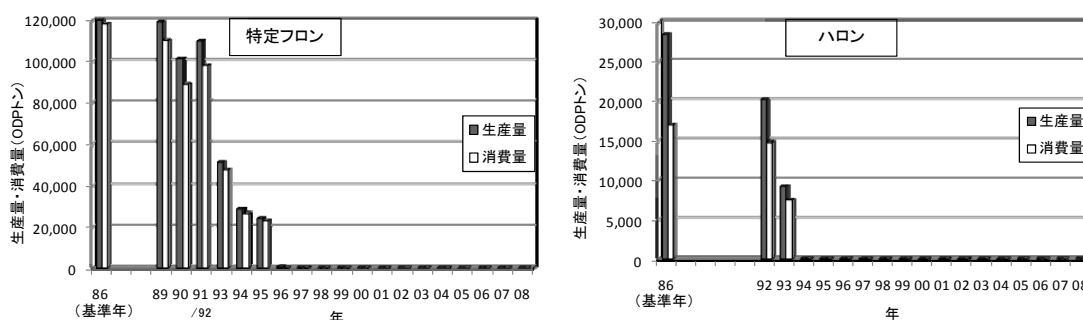


図 4-8 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 A）

（出典）経済産業省発表資料をもとに作成

* ODP トンは各生産量・消費量にオゾン破壊係数を乗じた数値。

** 消費量＝生産量＋輸入量－輸出量

表 4-2 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 B）

（単位：ODP トン）

年次 ⁽¹⁾	その他の CFC		四塩化炭素		1,1,1-トリクロロエタン	
	生産量	消費量	生産量	消費量	生産量	消費量
基準年 (1989年)	2,342	2,331	19,602	74,879	15,637	17,279
1993年	808	788	-	-	7,146	7,546
1994年	136	136	-	-	4,637	3,973
1995年	135	135	2463	255	5,248	4,088
1996年	0	0	539	-670	868	-48
1997年	0	0	0	-1	1,079	-55
1998年	0	0	0	-2	899	-52
1999年	0	0	0	-1	1,048	-38
2000年	0	0	0	-1	876	-34
2001年	0	0	0	-1	735	-326
2002年	0	0	0	-4	1250	-29
2003年	0	0	0	-2	569	-19
2004年	0	0	0	-1	565	-30
2005年	0	0	0	-1	400	0
2006年	0	0	0	0	348	0
2007年	0	0	0	0	418	0
2008年	0	0	0	0	246	0

(1) 各年は1月から12月までの値となっている。

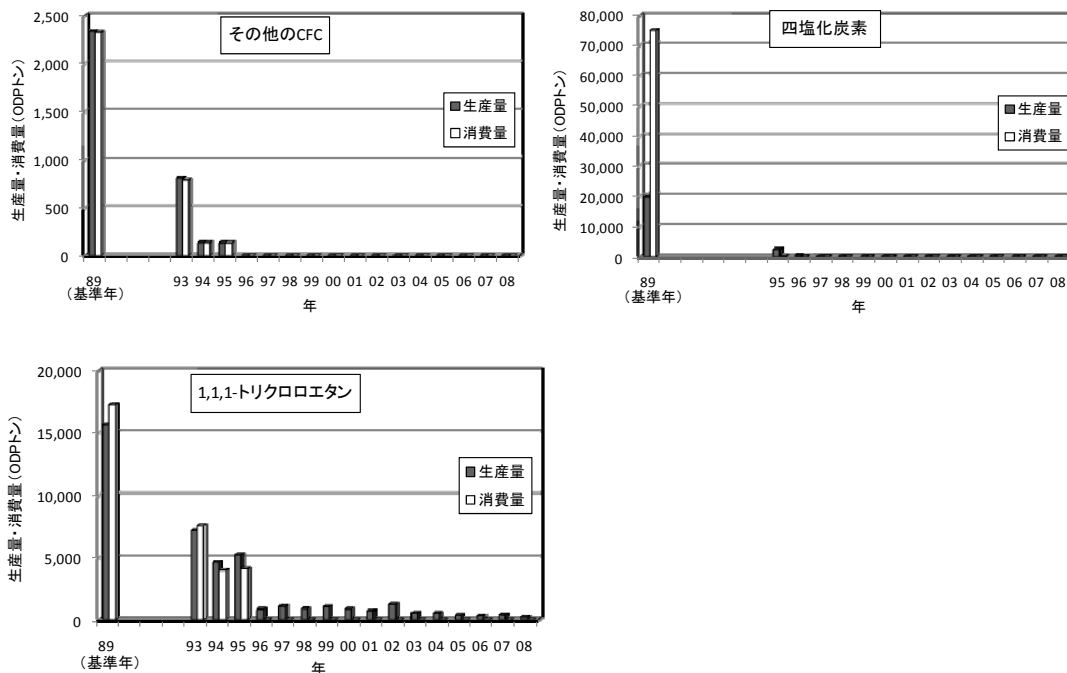


図 4-9 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 B）

（出典）経済産業省発表資料をもとに作成

表 4-3 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 C、E）

（単位：ODP トン）

年次 ⁽¹⁾	HCFC		HBFC		ブロモクロロメタン		臭化メチル	
	生産量	消費量	生産量	消費量	生産量	消費量	生産量	消費量
基準値	5,654 ⁽²⁾	5,562 ⁽³⁾					3,376 (1991年)	3,664 (1991年)
1995年	-	-	-	-	-	-	3,689	4,180
1996年	-	4,141	0	0	-	-	3,009	3,421
1997年	-	4,152	0	0	-	-	2,905	3,318
1998年	3,966	3,633	0	0	-	-	2,741	3,112
1999年	4,608	3,899	0	0	-	-	2,420	2,746
2000年	3,928	3,531	0	0	-	-	2,259	2,564
2001年	3,792	3,500	0	0	-	-	1,613	1,744
2002年	3,195	2,907	0	0	0	0	1,571	1,702
2003年	3,145	2,810	0	0	0	0	883	969
2004年	1,921	1,473	0	0	0	0	897	1,019
2005年	1,344	1,118	0	0	0	0	346	357
2006年	872	747	0	0	0	0	287	293
2007年	728	770	0	0	0	0	282	288
2008年	777	787	0	0	0	0	223	236

(1) 各年は1月から12月までの値となっている。

(2) HCFC の生産量の基準量=HCFC の1989年生産量算定値と消費量算定値の平均+CFC の1989年生産量算定値と消費量算定値の平均×0.028

(3) HCFC 消費量の基準量=HCFC の1989年消費量算定値+CFC の1989年消費量算定値×0.028

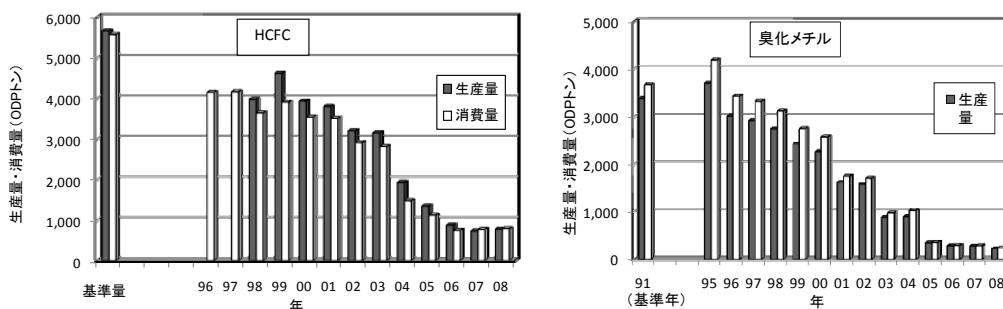


図 4-10 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 C、E）

（出典）経済産業省発表資料をもとに作成

②日本におけるフロン出荷量の推移

表 4-4 CFC 出荷量 (トン)

年次	CFC-11						CFC-12					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1985	2,139	4,283	18,295	200	291	25,208	18,834	7,059	8,269	0	149	34,311
1986	2,573	4,439	21,211	305	873	29,401	21,439	7,157	9,292	0	315	38,203
1987	2,802	4,511	25,609	503	806	34,231	22,716	7,042	11,004	0	178	40,940
1988	2,348	4,218	25,232	1,236	1,303	34,337	20,708	7,401	12,115	0	990	41,214
1989	3,051	3,807	23,541	1,156	930	32,485	24,880	6,585	9,606	0	335	41,406
1990	2,444	1,120	19,235	411	401	23,611	18,480	3,461	5,646	0	0	27,587
1991	2,156	653	17,286	713	158	20,966	15,495	2,544	2,825	81	501	21,446
1992	1,950	299	11,366	477	86	14,178	15,091	1,286	1,253	88	288	18,006
1993	2,305	93	8,557	531	14	11,500	20,109	1,016	261	75	249	21,710
1994	785	46	8,212	363	0	9,406	9,694	1,013	104	0	45	10,856
1995	493	299	6,850	23	88	7,753	4,678	423	101	0	174	5,376
1996	7	40	749	1	8	805	1,731	119	1	29	16	1,896
1997	7	95	189	0	17	308	484	172	0	0	16	672
1998	11	19	5	0	0	35	509	33	0	0	0	542
1999	0	34	7	0	4	45	58	62	0	0	5	125
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

年次	CFC-113						CFC-114					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1985	155	143	197	54,749	1,544	56,788	130	131	1,382	0	10	1,653
1986	144	159	176	62,182	917	63,578	134	150	1,318	0	11	1,613
1987	130	171	251	76,707	2	77,261	117	542	1,871	0	0	2,530
1988	115	23	276	79,968	3	80,385	141	401	2,057	0	60	2,659
1989	108	227	210	82,927	19	83,491	161	588	1,975	0	14	2,738
1990	168	160	224	57,177	75	57,804	57	41	1,424	0	0	1,522
1991	70	81	246	50,371	0	50,768	179	24	1,465	0	1	1,669
1992	93	9	274	26,462	0	26,838	194	17	690	0	1	902
1993	72	9	31	11,655	34	11,801	193	15	246	0	1	455
1994	204	4	21	10,709	4	10,942	43	15	17	0	256	331
1995	13	0	48	11,654	52	11,767	22	19	5	0	191	237
1996	0	0	0	1,598	179	1,777	24	12	0	0	4	40
1997	0	0	0	281	22	303	0	55	0	0	0	55
1998	0	0	0	91	0	91	0	0	0	0	0	0
1999	0	0	0	14	1	15	0	0	0	0	0	0
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

年次	CFC-115						CFC 合計					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1985	93	0	0	0	2	95	21,351	11,616	28,143	54,949	1,996	118,055
1986	119	0	0	0	11	130	24,409	11,905	31,997	62,487	2,127	132,925
1987	610	0	0	0	0	610	26,375	12,266	38,735	77,210	986	155,572
1988	616	0	0	0	9	625	23,928	12,043	39,680	81,204	2,365	159,220
1989	601	0	0	0	0	601	28,801	11,207	35,332	84,083	1,298	160,721
1990	686	0	0	0	0	686	21,835	4,782	26,529	57,588	476	111,210
1991	728	0	0	0	1	729	18,628	3,302	21,822	51,165	661	95,578
1992	679	0	0	0	1	680	18,007	1,611	13,583	27,027	376	60,604
1993	409	0	0	0	0	409	23,088	1,133	9,095	12,261	298	45,875
1994	214	0	0	0	0	214	10,940	1,078	8,354	11,072	305	31,749
1995	335	0	0	0	0	335	5,541	741	7,004	11,677	505	25,468
1996	39	0	0	0	0	39	1,801	171	750	1,628	207	4,557
1997	6	0	0	0	0	6	497	322	189	281	55	1,344
1998	0	0	0	0	0	0	520	52	5	91	0	668
1999	0	0	0	14	1	15	58	96	7	28	11	200
2000	-	-	-	-	-	-	40	0	0	5	26	71
2001	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2002	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2003	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2004	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2005	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2006	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2007	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 4-5 HCFC 出荷量 (千トン)

年次	HCFC-22						HCFC-141b					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1995	30.6	-	0.8	0	0.1	31.5	0	-	8.6	2.1	0	10.7
1996	31.7	-	0.6	0	0.3	32.6	0	-	13.5	3.2	0.1	16.8
1997	28.4	-	0.5	0	1.5	30.4	0	-	14.8	3	0	17.8
1998	27.5	-	0.4	0	1.6	29.5	0	-	12.9	3.3	-	16.2
1999	26.8	-	0.3	0	1.7	28.8	0	-	11.9	4	-	15.9
2000	24	-	0	-	2	26	0	-	11	3	0	15
2001	21.6	-	0.2	0	1.2	23	0	-	9.3	3	0.2	12.5
2002	15.6	-	0.2	0	0.7	16.5	0	-	9.3	3	0	12.4
2003	13.7	-	0.1	0	1.2	15	0	-	11.5	3	0	14.5
2004	12.7	0	0	0	1.2	14	0	0	0.7	2.3	0	3.1
2005	10.8	0	0	0	1.2	12	0	0	0	2.3	0	2.3
2006	9.1	0	0	0	0.1	9.2	0	0	0	2.5	0	2.5
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

年次	HCFC-142b						HCFC-225					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1995	0	-	3.7	0	0.1	3.8	0	-	0	1.2	0	1.2
1996	0	-	3.9	0	0.1	4	0	-	0	2	0	2
1997	0	-	3.84	0	0.24	4.1	0	-	0	2.8	0	2.8
1998	0	-	3.4	0	0.2	3.6	0	-	0	2.6	0	2.6
1999	-	-	3.7	0	0.7	4.4	0	-	0	3	0.1	3.1
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

年次	HCFC-123						HCFC-124					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1995	0.5	-	0	0	0	0.5	0	-	0.02	0.02	0	0.04
1996	0.5	-	0	0	0	0.5	0.01	-	0.02	0	0	0.03
1997	0.4	-	0	0	0	0.4	0	-	0.03	0	0	0.03
1998	0.4	-	0.02	-	-	0.4	-	-	0.02	0	-	-
1999	0.3	-	-	0	-	0.3	-	-	0.1	0	0	0.1
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

年次	HCFC-142b,225,123,124 の計						HCFC 合計					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1995	0.5	-	3.72	1.22	0.1	5.54	31.1	-	13.12	3.32	0.2	47.74
1996	0.51	-	3.92	2	0.1	6.53	32.21	-	18.02	5.2	0.5	55.93
1997	0.4	-	3.87	2.8	0.24	7.33	28.8	-	19.17	5.8	1.74	55.53
1998	0.4	-	3.44	2.6	0.2	6.6	27.9	-	16.74	5.9	1.8	52.3
1999	0.3	-	3.8	3	0.8	7.9	27.1	-	16	7	2.5	52.6
2000	0	-	4	3	1	7	25	-	15	6	2	48
2001	0.3	-	3.5	2.2	0.7	6.7	21.9	-	13	5.2	2	42.1
2002	0.2	-	2.9	2	0.1	5.2	15.8	-	12.3	5	0.8	34.1
2003	0.2	-	1.4	1.6	0.2	3.4	13.9	-	13	4.6	1.4	32.9
2004	0.2	0.1	0.4	2.8	0	3.4	12.9	0.1	1.1	5.1	1.3	20.5
2005	0.2	0.1	0	2.3	0.2	2.8	11	0.1	0	4.6	1.4	17.1
2006	0.2	0.1	0	1.3	0.1	1.7	9.3	0.1	0	3.8	0.1	13.3
2007	-	-	-	-	-	-	8	0.1	0	3.4	0.3	11.8

表 4-6 HFC 出荷量 (千トン)

年次	HFC-134a						その他 HFC					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1995	7.8	1.2	0.3	0	0	9.3	0.1	0	0	0	0.1	0.2
1996	8.6	1.8	0.4	0	0	10.8	0.1	0	0	0	0.1	0.2
1997	8.9	2.2	0.4	0	0	11.5	0.2	0	0	0	0.2	0.4
1998	8.4	2.5	0.5	0	0	11.4	0.4	0	0	0.2	0.3	0.9
1999	9.6	3.1	0.6	0	0.2	13.5	1	0	-	-	0.2	1.2
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

年次	HFC 合計					
	冷媒	エアゾール	発泡剤	洗浄剤	その他	合計
1995	7.9	1.2	0.3	0	0.1	9.5
1996	8.7	1.8	0.4	0	0.1	11
1997	9.1	2.2	0.4	0	0.2	11.9
1998	8.8	2.5	0.5	0.2	0.3	12.3
1999	10.6	3.1	0.6	0	0.4	14.7
2000	11	3	1	0	1	16
2001	14	2.9	0.7	0	0.2	17.9
2002	18	3.1	0.8	0.1	0.5	22.5
2003	19.2	2.9	1.5	0.1	0.5	24.2
2004	21	2.4	3.3	0.3	0.5	27.5
2005	22.8	2.3	5.2	0.3	0.1	30.7
2006	23.5	2	7.6	0.8	0.3	34.1
2007	24.9	1.4	6.9	0.8	0.2	34.3

※2000年、2007年に集計方法が変更され、現在はCFC、HCFC、HFC出荷量の合計値のみが示されている。また、2008年以降のフルオロカーボン国内出荷量の集計は行われていない。さらに、内訳の合計と合計の数値は四捨五入の関係で一致しないことがある。

(出典) 日本フルオロカーボン協会公表資料をもとに作成

(2) 冷媒フロン類の回収・破壊

既に生産され、製品中に含まれているフロン類及び代替フロンの大気中への排出を抑制し、オゾン層保護及び地球温暖化防止に資するため、業務用冷凍空調機器については「特定製品に係るフロン類の回収及び破壊の実施の確保等に関する法律(フロン回収・破壊法)」、家庭用冷凍冷蔵庫・エアコンについては「特定家庭用機器再商品化法(家電リサイクル法)」、カーエアコンについては「使用済自動車の再資源化等に関する法律(自動車リサイクル法)」に基づき、使用済機器等から冷媒フロン類を回収し、適切に破壊することとしている。

表 4-7 冷媒フロン類を回収した機器の台数 (千台)

機 器	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度
業務用冷凍空調機器	866	952	905	878	1,033	1,237
家庭用エアコン	1,579	1,809	1,990	1,835	1,890	1,968
家庭用冷蔵冷凍庫	2,653	2,807	2,807	2,709	2,725	2,746
カーエアコン	1,697	1,830	2,469	2,628	2,663	2,755
合 計	6,795	7,398	8,171	8,050	8,311	8,668

注) カーエアコンについては、自動車リサイクル法及びフロン回収・破壊法による回収の合計。

表 4-8 冷媒フロン類の回収量 (t)

機 器	フロン類の種類	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度
業務用冷凍空調機器	CFC	338	298	292	348	342	290
	HCFC	1,458	1,665	1,823	1,987	2,404	2,814
	HFC	94	140	183	206	422	669
	計	1,889	2,102	2,298	2,541	3,168	3,773
家庭用エアコン	HCFC	858	989	1,112	1,024	1,048	1,098
	HFC	2	5	10	19	40	67
	計	860	994	1,122	1,043	1,088	1,166
家庭用冷蔵冷凍庫	CFC	262	269	249	218	196	177
	HCFC	5	7	10	11	12	12
	HFC	20	35	52	68	91	111
	計	287	311	311	298	299	299
カーエアコン	CFC	415	381	354	258	192	141
	HFC	223	321	457	546	617	731
	計	638	701	811	803	809	873
モントリオール 議定書規制物質	CFC	1,015	947	894	824	730	608
	HCFC	2,320	2,662	2,945	3,022	3,464	3,942
	小計	3,335	3,609	3,839	3,845	4,194	4,532
京都議定書規制物質	HFC	339	500	701	840	1,170	1,549
合 計		3,674	4,109	4,541	4,685	5,364	6,081

注1) 小数点未満を四捨五入したため、表中の数値の和は必ずしも合計欄の値に一致しない。

注2) カーエアコンについては、自動車リサイクル法及びフロン回収・破壊法による回収量の合計。自動車リサイクル法に基づく回収量は次の計算式により算出した。自動車製造業者等による取引量+フロン類回収業者による再利用量+フロン類回収業者による当年度未保管量-フロン類回収業者による前年度未保管量。

表 4-9 冷媒フロン類の破壊量

(t)

機 器	フロン類の種類	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度
業務用冷凍空調機器 カーエアコン	CFC	627	954	557	590	479	376
	HCFC	1,467	1,604	1,625	1,821	2,095	2,439
	HFC	335	418	609	772	1,036	1,346
	計	2,429	2,976	2,790	3,183	3,611	4,161
家庭用エアコン	HCFC	849	966	1,107	1,028	1,043	1,103
	HFC	2	5	10	18	40	66
	計	851	971	1,117	1,046	1,083	1,169
家庭用冷蔵冷凍庫	CFC	257	267	249	219	197	179
	HCFC	4	7	10	12	12	12
	HFC	19	34	51	67	90	111
	計	280	309	310	298	299	301
モントリオール 議定書規制物質	CFC	884	1,221	806	809	676	555
	HCFC	2,320	2,577	2,742	2,861	3,150	3,554
	小計	3,204	3,798	3,548	3,670	3,826	41,09
京都議定書規制物質	HFC	356	457	670	857	1,166	1,523
合計		3,560	4,255	4,218	4,527	4,992	5,632

注1) 小数点未満を四捨五入したため、表中の数値の和は必ずしも合計欄の値に一致しない。

(3) 冷媒フロン類以外のストック対策

①断熱材中フロン類の回収・破壊に向けた取組

- ・ 家庭用冷凍冷蔵庫に使用される断熱材中のフロン類については、家電リサイクル法に基づき、回収・破壊等がなされている。
- ・ 建材用断熱材中のフロン類については、環境省において平成12年以降回収・破壊のための技術的事項を調査し、平成19年に「建材用断熱材フロンの処理技術」をとりまとめた。

②消火剤ハロン類の回収・再利用・破壊に向けた取組

- ・ 建築物や危険物施設、船舶、航空機等に設置される消火設備・機器等の消火剤として使用されているハロンについては、国家ハロンマネジメント戦略(2000年)に基づき、特定非営利活動法人「消防環境ネットワーク」を中心として、データベースの管理、不可欠用途(クリティカルユース)の十分な管理、回収・リサイクルの推進等が行われている。
- ・ 今後、1980年代から1990年代初頭に建設された数多くの建築物が解体時期を迎えることに伴って回収されるハロン量の増加が予想されることなどを踏まえ、環境省では、不要・余剰となったハロンを適切に破壊処理するための技術的事項を調査し、平成18年5月に「ハロン破壊処理ガイドライン」をとりまとめた。

表 4-10 ハロンの設置状況（平成 21 年 12 月 31 日現在）

ハロン種類	設備名	設置件数	ハロン量 (kg)
ハロン-1301	消火設備	30,637	15,404,537
	消火装置	9,606	691,086
	消火器	6,778	133,541
	小計	47,021	16,229,164
ハロン-2402	消火設備	368	182,316
	消火装置	64	9,436
	消火器	100	2,550
	小計	532	194,302
ハロン-1211	消火設備	36	15,708
	消火装置	7	500
	消火器	497	25,418
	小計	540	41,626
合計		48,093	16,465,092

(出典) ハロン等抑制対策連絡会 ハロン等抑制対策に関する報告書（平成 21 年度）

表 4-11 消防環境ネットワークの管理によるハロン-1301 の回収、供給量

年度	供給量(t)	回収量(t)
1994	100	27
1995	117	56
1996	126	59
1997	111	46
1998	73	94
1999	57	78
2000	65	97
2001	66	104
2002	63	80
2003	52	112
2004	100	118
2005	123	133
2006	173	110
2007	208	145
2008	156	146

(出典) ハロン等抑制対策連絡会 ハロン等抑制対策に関する報告書（平成 21 年度）

(4) 化学物質排出把握管理促進法に基づく排出量の把握

平成13年度からPRTR（化学物質排出移動量届出制度）が始まり、オゾン層破壊物質の排出量等について、事業者の届出による事業場からの排出量等と、国の推計による事業場以外からの排出量が毎年公表されている。

表 4-12 平成20年度のオゾン層破壊物質のPRTRによる排出量等

(単位：kg/年)

物質名	政令 番号	届出排出量*1		届出外 排出量*2	排出量 合計	(参考)排出 量 (ODP トン)	(参考)排出 量 (万CO2 トン)	届出 移動量*3	
		大気	公共用水 域						
CFC	CFC-11	217	6,616	0	561,893	568,509	568.5	270.0	36,450
	CFC-12	121	8,197	0	686,305	694,502	694.5	757.0	15,000
	CFC-113	213	4,376	1	0	4,377	3.5	2.7	0
	CFC-114	123	44	0	0	44	0.0	0.0	0
	CFC-115	94	0	0	104,430	104,430	62.7	77.0	0
	CFC-13	88	0	0	0	0	0.0	0.0	0
	CFC-112	201	0	0	0	0	0.0	0.0	0
合計		19,233	1	1,352,628	1,371,862	1329.2	1106.7	51,450	
ハロン	ハロン1211	285	0	0	0	0	0.0	0.0	0
	ハロン1301	286	11,305	0	10,774	22,079	220.8	15.8	0
	ハロン2402	162	0	0	1,869	1,869	11.2	0.3	1,500
	合計		11,305	0	12,643	23,948	232.0	16.1	1,500
HCFC	HCFC-21	133	230	0	0	230	0.0		0
	HCFC-22	85	333,854	0	13,331,517	13,665,371	751.6	2473.4	160,603
	HCFC-123	124	73,009	0	184,813	257,822	5.2	2.0	990
	HCFC-124	86	2,148	0	0	2,148	0.1	0.1	0
	HCFC-133	87	18,000	0	0	18,000	1.1		3,100
	HCFC-141b	132	723,751	0	5,557,509	6,281,260	690.9	455.4	78,436
	HCFC-142b	84	16,583	0	625,912	642,495	41.8	148.4	6,900
	HCFC-225	144	402,018	0	684,021	1,086,039	76.0	38.9	52,530
合計		1,569,593	0	20,383,772	21,953,365	1566.6	3118.3	302,559	
四塩化炭素	112	5,864	260	0	6,124	6.7	0.9	228,919	
1,1,1-トリクロロエタン	209	7,940	11,066	0	19,006	1.9	0.3	18,006	
臭化メチル	288	217,099	150	1,054,053	1,271,302	762.8	0.6	8,100	
合計		1,831,034	11,477	22,803,096	24,645,607	3,899	4,243	610,534	

*1 PRTRの対象となる事業所から1年間に環境中に排出された量として、事業者から国へ届け出られた量

*2 PRTRの対象となる事業所以外から環境中へ排出される量として、国が推計した量

*3 PRTRの対象となる事業所から1年間に廃棄物として事業所の外へ運び出された量

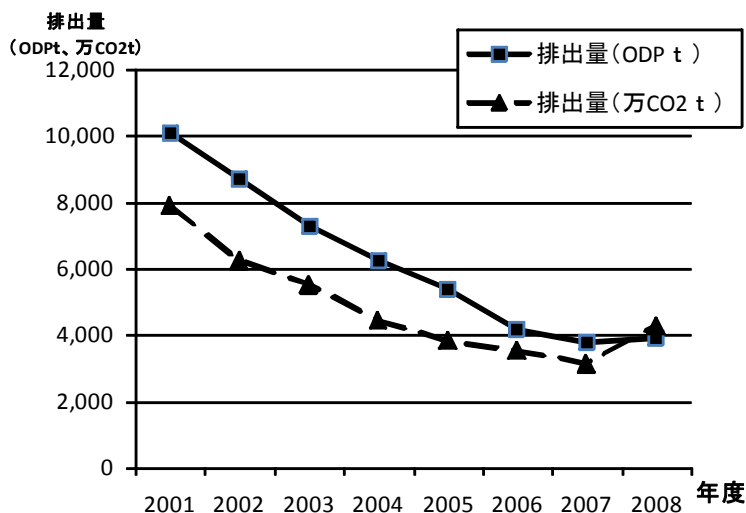


図 4-11 PRTR に基づくオゾン層破壊物質の排出量 (ODP 換算、CO₂換算)

(5) 代替フロン等 3 ガスの対策

オゾン層破壊物質である CFC、HCFC の代替物質として使用されている HFC を含む代替フロン等 3 ガス (HFC、PFC、SF₆) は、強力な温室効果ガスであることから、京都議定書の対象物質となっており、京都議定書目標達成計画に基づき、基準年 (1995 年) の水準から基準年総排出量比で▲1.6%の水準 (約 3,100 万 t-CO₂) にすることを目標としている。

表 4-13 代替フロン等 3 ガスの排出量及び目標とガス別の目安

代替フロン等 3 ガス	基準年 (1995 年)	2005 年		2010 年 (目標)	
	百万 t-CO ₂	百万 t-CO ₂	基準年 総排出量比	百万 t-CO ₂	基準年 総排出量比
合計	51	18	-2.6%	31	-1.6%
HFC	20	7	-1.0%	22	+0.1%
PFC	14	6	-0.6%	5	-0.7%
SF ₆	17	4	-1.0%	4	-1.0%

(出典) 京都議定書目標達成計画

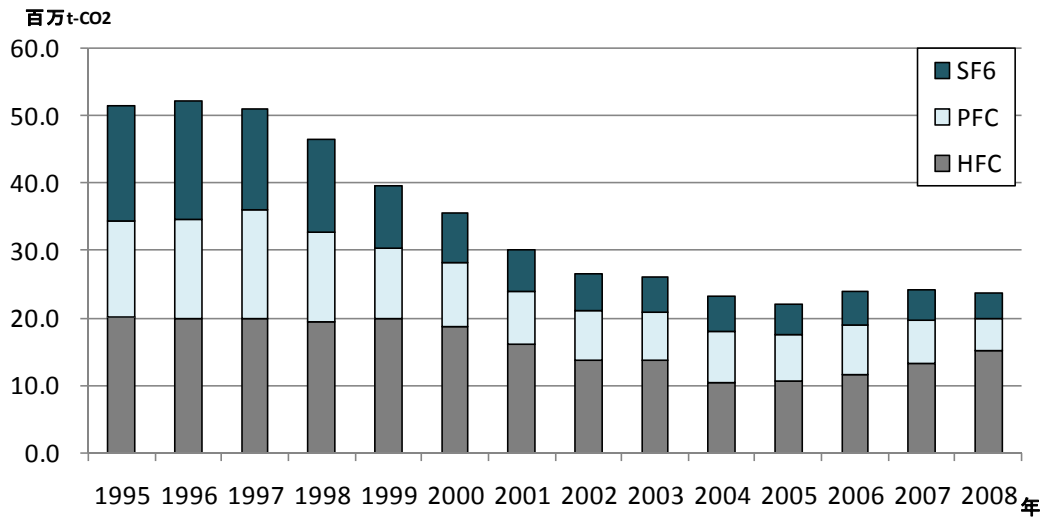


図 4-12 代替フロン等 3 ガスの排出量の推移 (ガス別)

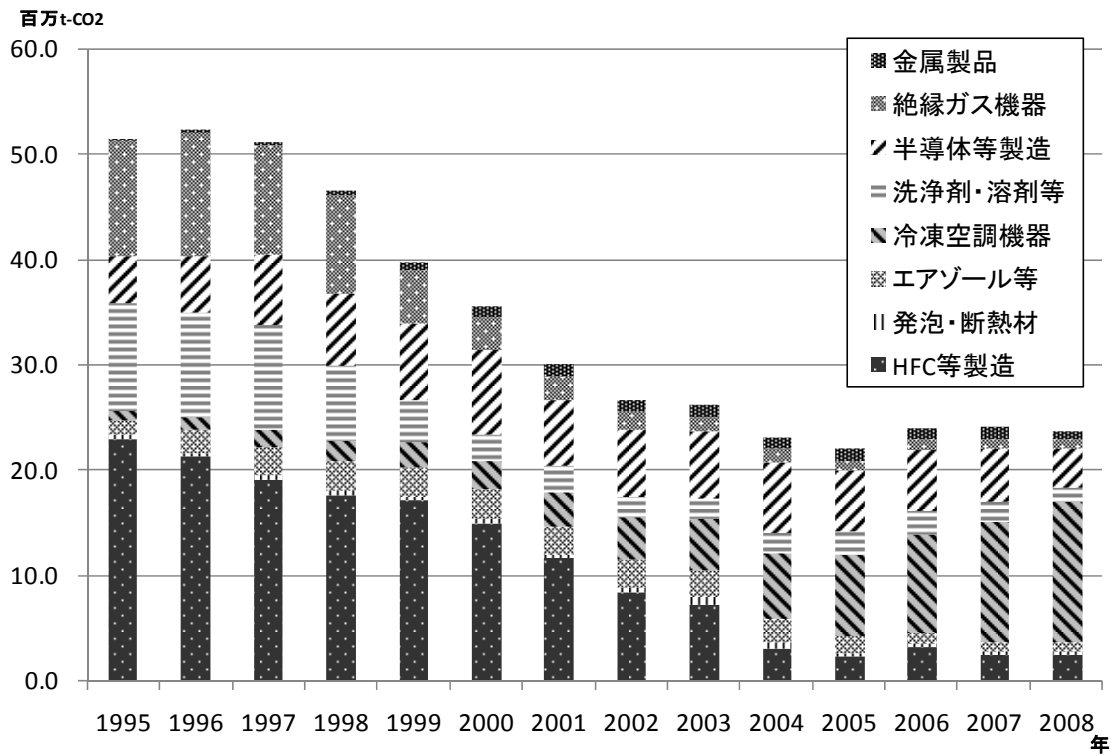


図 4-13 代替フロン等 3 ガスの排出量の推移 (排出源別)

(6) ノンフロン化の推進

①グリーン購入法に基づくノンフロン化の推進

フロンを使わない製品（ノンフロン製品）の普及を促進するため、「国等による環境物品等の調達に関する法律（グリーン購入法）」に基づき、国等の行政機関に対してノンフロン製品の調達を義務付けている。

表 4-14 グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に基づく環境物品等の調達の推進に関する基本方針（フロン関係抜粋）（平成 22 年 7 月現在）

ダストブロワー	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●オゾン層を破壊する物質及びハイドロフルオロカーボン（いわゆる代替フロン）が使用されていないこと。ただし、可燃性の高い物質が使用されている場合にあっては、製品に、その取扱いについての適切な記載がなされていること。 <p>（備考）</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ダストブロワーを、引火の危険性があり、安全性の確保を必要とする用途に使用する場合については、当該品目に係る判断の基準は適用しないものとする。なお、その場合にあっては、オゾン層を破壊する物質及び地球温暖化係数（地球温暖化対策の推進に関する法律施行令（平成 11 年政令第 143 号）第 4 条に定められた係数）150 以上の物質が含まれていないものを使用すること。
電気冷蔵庫、 電気冷凍庫、 電気冷凍冷蔵庫	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●冷媒及び断熱材発泡剤にオゾン層を破壊する物質が使用されていないこと。 ●冷媒及び断熱材発泡剤にハイドロフルオロカーボン（いわゆる代替フロン）が使用されていないこと。 <p>【配慮事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●冷媒及び断熱材発泡剤に可能な限り地球温暖化係数の小さい物質が使用されていること。
エアコンディ ションナー	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●冷媒にオゾン層を破壊する物質が使用されていないこと。
ガスヒートポン プ式冷暖房機	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●冷媒にオゾン層を破壊する物質が使用されていないこと。
ヒートポンプ式 電気給湯器	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●冷媒にオゾン層を破壊する物質が使用されていないこと。 ●ハイドロフルオロカーボン（いわゆる代替フロン）が使用されていないこと。
マットレス	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ウレタンフォームの発泡剤にオゾン層を破壊する物質が使用されていないこと、及びハイドロフルオロカーボン（いわゆる代替フロン）が使用されていないこと。
断熱材	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●建築物の外壁等を通しての熱の損失を防止するものであって、次の要件を満たすものとする。 <ul style="list-style-type: none"> ・オゾン層を破壊する物質が使用されていないこと。 ・ハイドロフルオロカーボン（いわゆる代替フロン）が使用されていないこと。 <p>【配慮事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●発泡プラスチック断熱材については、長期的に断熱性能を保持しつつ可能な限り地球温暖化係数の小さい物質が使用されていること。
氷蓄熱式 空調機器	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●冷媒にオゾン層を破壊する物質が使用されていないこと。
ガスエンジン ヒートポンプ式 空気調和機	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●冷媒にオゾン層を破壊する物質が使用されていないこと。
庁舎管理	<p>【配慮事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●庁舎管理に空気調和設備のメンテナンスを含む場合にあっては、冷媒として用いられるフロン類の漏洩の防止及び充填等作業に伴う大気放出の抑制に努めていること。

※本表はフロン類関係を抜き出したものであり、それ以外の判断基準がある場合がある。詳しくは「環境物品等の調達の推進に関する基本方針」を参照のこと。

②省エネ自然冷媒冷凍等装置導入促進事業

アンモニアや二酸化炭素などの自然冷媒を使用した冷凍・冷蔵・空調装置は、導入費用が高いこと等により普及が進みにくい状況にある。このため、環境省では、このような省エネ自然冷媒冷凍等装置とフロン冷媒冷凍等装置の導入費用の差額の 1/3 の金額を導入事業者に対して補助することにより、省エネ自然冷媒冷凍等装置の導入を促進している（平成 20～24 年度）。

③その他のノンフロン化普及促進の取組

環境省では、自然冷媒冷凍空調機器、ノンフロン家庭用冷凍冷蔵庫、ノンフロンダストブロワー、ノンフロン断熱材（硬質ウレタンフォーム）の 4 品目について、ノンフロン製品の紹介冊子を作成し、その普及に取り組んでいる。

(6) 開発途上国への支援

モントリオール議定書に基づく規制は、開発途上国については平成 11 年から開始されたところであり、開発途上国の議定書の遵守状況が今後のオゾン層の回復に大きく影響することから、開発途上国に対し、我が国の排出抑制、回収・破壊、オゾン層破壊物質からの代替に関する技術・経験をいかした支援を行っていく必要がある。このため、開発途上国の政府職員等に対するオゾン層保護政策に関する研修等が実施されている。

また、環境省では、モントリオール議定書多数国間基金を活用した開発途上国における二国間協力プロジェクトを実施するため、支援方策の提案やプロジェクトの形成などを行っている。特に、今後開発途上国において、余剰となり、又は汚染等により再利用できないオゾン層破壊物質の増加が予想されることから、これら不要となったオゾン層破壊物質の処理方策について検討を行い、日本の回収・破壊に関する制度的・技術的知見をいかした技術協力を力を入れている。

表 4-15 我が国のモントリオール議定書多数国間基金への拠出金

期間	拠出金総額（含繰り越し）	我が国の拠出金
第 1 期 1991-1993 年	24,000 万ドル	3,300 万ドル
第 2 期 1994-1996 年	51,000 万ドル	6,500 万ドル
第 3 期 1997-1999 年	54,000 万ドル	8,500 万ドル
第 4 期 2000-2002 年	47,570 万ドル	9,900 万ドル
第 5 期 2003-2005 年	57,300 万ドル	10,400 万ドル
第 6 期 2006-2008 年	47,000 万ドル	8,800 万ドル
第 7 期 2009-2011 年	49,000 万ドル	8,073 万ドル

表 4-16 我が国の途上国支援プロジェクトの例（環境省担当）

対象国	プロジェクト名	時期	支援額	支援内容
スリランカ	アジア太平洋地域におけるモントリオール議定書の遵守促進のための多数国間基金による戦略的計画の実施	2001～2002年	167,805 ドル (多数国間基金)	途上国自身が自立してモントリオール議定書を遵守するため、自国のオゾン層破壊物質消費状況の全体像を把握し、すべてのオゾン層破壊物質を撤廃するための計画である国家遵守戦略(National Compliance Strategy)を作成することを支援。
イラン・モンゴル	アジア太平洋地域におけるモントリオール議定書の遵守促進のための多数国間基金による戦略的計画の実施(第2フェーズ)	2002～2003年	141,250 ドル (多数国間基金)	上記プロジェクトの継続事業として、イラン及びモンゴルを対象に、関係国際機関と協力し、調整会合の実施等を支援。
スリランカ	国家遵守行動計画 (National Compliance Action Plan)	2005～2009年	751,902 ドル (多数国間基金)	2010年のCFC消費量全廃のための包括的支援。CFCの回収・再利用、カーエアコンの改修、貿易管理、技術者訓練等。
モンゴル	最終削減管理計画 (Terminal Phase-out Management Plan)	2005～2009年	269,957 ドル (多数国間基金)	2010年のCFC消費量全廃のための包括的支援。CFCの回収・再利用、貿易管理、技術者訓練等。
インドネシア	フロン破壊処理施設整備事業	2006年～	—	セメントキルンを改修したフロン破壊処理施設の設置、破壊実証試験等。
アジア太平洋地域	不要オゾン層破壊物質破壊処理実証事業準備	2008～2009年	33,900 ドル (多数国間基金)	アジア太平洋地域での不要オゾン層破壊物質破壊処理のロジスティック、破壊処理施設の設置等のための多数国間基金プロジェクトの準備。
モンゴル	XPS製造工場におけるHCFC消費量削減事業準備	2010年	60,000 ドル (多数国間基金)	モンゴル国内の2つのXPS製造工場におけるHCFC転換のための多数国間基金プロジェクトの準備。

2. WMO科学評価パネル報告書要旨(2006年)*

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、安定又は減少している兆候が示された（図4-14 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（図4-14 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に単純に結びつくわけではない（図4-14c、d 参照）。

我々は、これまでのオゾン層破壊物質のふるまい、及びオゾン層破壊物質と他の要因に

* 気象庁「オゾン層観測報告:2006」より引用、一部改変

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。

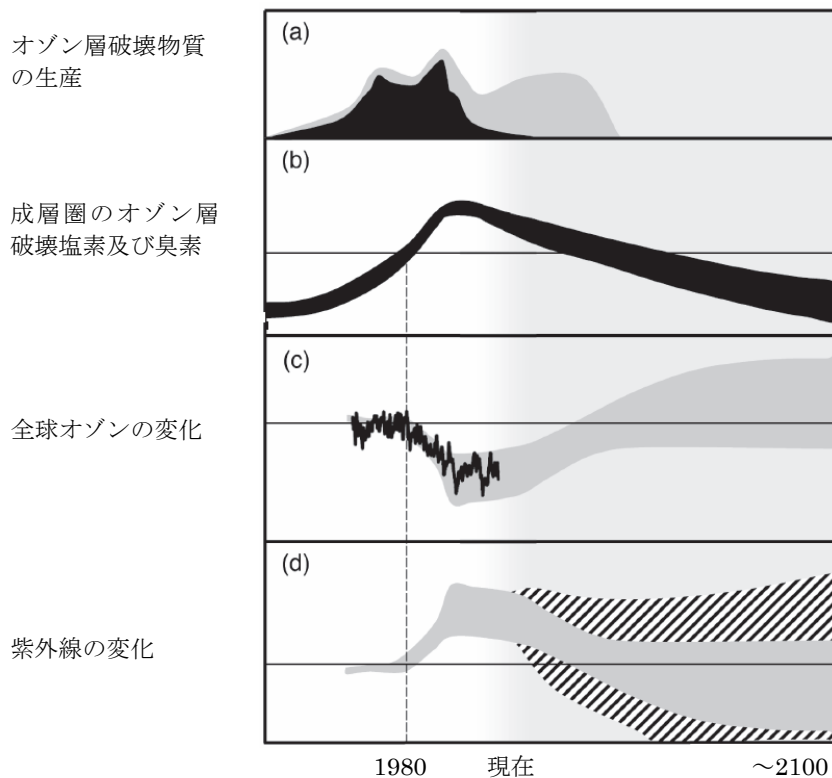


図 4-14 オゾン層破壊物質、オゾン層及び紫外線：過去、現在、未来

(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) 地球規模のオゾン全量の変化（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ホルム（別名 1,1,1-トリクロロエタン）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いただろうか。

- ・ 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。

(地球規模のオゾン (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ない。

- 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、下部成層圏の地球規模の平均気温は約 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世界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通り、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、地球規模（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又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、地球規模のオゾン全量の 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、吸収又は散乱を通じて、地表到達紫外線量の増加又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定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）又は極短寿命（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、成層圏オゾン層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ホ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、

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。

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、メチルクロロホルムの減少は約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、主にメチルクロロホ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。
 - 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、HCFC-142b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。
 - メチルクロロホルムは減少し続け、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。この負荷量の不確実さは、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定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の地球規模の放出量はそれぞれ 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、メチルクロロホ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地球規模の放出量との有益な比較は現時点では行えない。メチルクロロホルムの地域放出量見積もりから、2000年以降の地球規模の放出量は概ね 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、対流圏での分布が一様ではない。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 CH_3Br ）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、現在の大气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。VSLs 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。
- ・ フィルム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、とりわけクロロホルム、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。
- ・ VSLs 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 地球規模のオゾン（南緯 60 度～北緯 60 度）

（オゾン全量）

- ・ 2002～2005 年の地球規模の平均オゾン全量は、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地球規模の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。

(地球規模の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、ハロゲンの変化が地球規模の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、地球規模の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 (HOx) 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が体積 (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が出現が続いている。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、オゾンホールの深刻さを弱めた。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大変活発で、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、必ずしも物理又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 雲は脱窒を促し、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、脱窒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、下部成層圏の地球規模の平均気温は 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地球規模の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地球規模の平均寒冷化傾向（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、ともに地球規模の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地球規模の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）衛星による地球規模の水蒸気観測は、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、この領域のオゾンに直接制御しており、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地球規模の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、オゾンの変化又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

- ・ 地球規模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 と呼ばれるが、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、産業及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、地球規模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、地球規模の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、特段の例外がなく地球規模で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「オゾン層と全地球的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類とパーフルオロカーボン類に関する課題」（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、地球規模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、又は、地球規模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 4-17 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

化合物又は化合物群	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
メチルクロロホルム (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「オゾン層と全地球的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類とパーフルオロカーボン類に関する課題」(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に加え、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及び検疫・出荷前処理（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 年又は 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% 又は 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、 CF_3I 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「オゾン層と全地球的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類とパーフルオロカーボン類に関する課題」（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。

3. UNEP 環境影響評価パネル報告書要旨(2006年)*

オゾン層破壊の環境影響：2006 アセスメント
Environmental Effects of Ozone Depletion：2006 Assessment

オゾン層破壊と気候変化との相互作用
Interactions of Ozone Depletion and Climate Change

総括要旨
Executive Summary

オゾン量と紫外線の変化

・モントリオール議定書に基づく規制が効果をあげており、大気中のオゾン層破壊物質濃度は現在減少しつつある。極域外では1980年代～1990年代に見られたオゾン量の減少は現在観測されていない。一方極域では、非常に大きな変動がみられる。毎春、南極では大きなオゾンホールが継続して発生しているが、北極でのオゾン層破壊はより軽度である。これらの変化のうちのいくつかは、単にオゾン層破壊物質の減少に起因するというよりむしろ大気循環の変化によって起こることがわかっており、これは気候変化との連動を示すのかもしれない。地球規模のオゾン量は、1970年代に比べて依然少ないままである。オゾン量の変化は直接UV-B照射量に影響するため、オゾン量減少によるUV-B照射量の高い状態は今後も継続すると予想される。

・大気中オゾン量の今後の変化は依然として不確かである。今後数十年の間、オゾン量は徐々に増加すると予想されるが、オゾン層破壊前の状態と比べて高いレベル、同等、低いレベルのいずれの状態に戻るかはわからない。現在の化学モデルは、観測されたオゾン変動のすべてを正確には再現できておらず、将来の温室効果ガス増加速度は明らかにされていない。また、オゾン層破壊と気候変化の相互作用もまだ充分には理解されていない。現在のモデルは、中緯度地域では今世紀半ばまでに、極緯度地域ではその10～20年後頃には、オゾン層が人為起源のオゾン層破壊ガスの影響から回復すると予測している。

・オゾン量変化に起因するUV-B照射量の長期変化が観察された。オゾン層破壊が進行した期間をとおして、UV-B照射量が増加した。南半球の空気の清浄な地域では、1990年代後半以降UV-B照射量が減少したといういくつかの証拠がある。入手できる紫外線データ

* 環境省による仮訳

や時間的範囲の拡大が見られたため、最近の変化を、オゾン測定が初めて可能になった1920年代後半以降のオゾン量推定値と比較することにより評価できるようになった。1980年から20世紀末までのUV-B照射量の増加は、長期間の自然変動に比べ大きい値を示している。

・UV-B照射量の長期変動に対するエアロゾルと大気汚染物質の影響は、オゾン量の変化に起因する影響に匹敵すると考えられる。北半球のいくつかの地域では、オゾン層破壊は止まったにもかかわらず、エアロゾルによるUV-Bの吸収が1990年代以降継続的に減少しているため、UV-B照射量は増加が続くことも考えられる。

・オゾン層破壊と気候変化の相互作用は複雑であり、化学、放射及び大気循環パターンの変化によって影響されている可能性がある。この関係は双方向であって、オゾン層変化が気候に影響し、また気候変化がオゾン層に影響する。過去に行われたアセスメントのいくつかのモデルによる予測に反し、最近のモデルと観察結果によると、成層圏オゾン層(UV-Bについても)は、オゾン層破壊物質の変化に比較的早く反応しており、気候との相互作用はこの変化を遅らせないことを示唆している。

・UV-B照射量は気候変化の影響が加わるため、将来の地表UV-B照射量の不確実性はオゾン層に対する不確実性より大きい。気候変化は、オゾン量とは関係なく、雲量・エアロゾル量・地表面反射率の変化を介してUV-B照射量に影響を与えうる。気候変化のスピードは加速しており、21世紀における気温変化は、20世紀より約5倍大きいと考えられる。また、この変化は今後、雲量・エアロゾル量・地表面反射率に影響を与える。その結果、気候変化に対し効果的な緩和措置がとられなければ、地表への太陽紫外線照射量や生物圏に対する顕著な影響が予想されうる。

健康

・皮質白内障に加えて、核白内障が太陽紫外線に関連することが明らかになった。多くの研究により、太陽紫外線へのばく露が皮質白内障発症の要因であることが示されている。最近のいくつかの報告が核白内障と紫外線ばく露との関連性を裏付けている。さらに、気温が高いほど核白内障発症リスクが増加する可能性もある。それに反し、後囊下白内障の誘発という点において太陽紫外線が原因となると推論するには、証拠は不十分である。

・太陽光へのばく露は、翼状片の重要な危険因子である。翼状片は、視力を著しく低下させる、炎症性、増殖性かつ浸潤性のヒト角膜における病変である。その一部はUV-Bばく露で起こる細胞内損傷により引き起こされる。遺伝的要因と太陽光への長時間ばく露は、すべての皮膚色の人にとって翼状片発症の重要な要因である。

・紫外線の眼に対する光生物学的な悪影響は、雲の存在で増幅されうるため、気候変化によって影響される。直射太陽光は、急性光角膜炎、眼の日焼け、さらには白内障発症の主要因とはならないが、散乱又は反射した UV-B はこれらの異常に寄与する。雲に覆われ、光量が弱い場合、眼の自然防御機構が緩み、眼の前方表面と内部構造に高いばく露を与えることになる。同時に、雲に覆われているときには光が散乱するため、眼に影響する UV-B ばく露は増加しうる。

・有棘細胞がん(SCC)、基底細胞がん(BCC)と黒色腫の発生率は上昇を続けている。オランダや白色人種が大部分を占める他の多くの国々では、2000～2015 年の間にこれら 3 つのタイプの皮膚がんがほぼ倍増すると推計されている。黒色腫の発生率増加の主なもの、生存率の高い薄(初期)黒色腫である。小児の黒色腫発生率は依然として増加しており、環境中の紫外線ばく露と正の関連を示している。

・皮膚がん感受性は、DNA 損傷の防止と修復に関与している蛋白質の遺伝情報を規定する遺伝子の僅かな差に関係していると認識されるようになってきている。このような蛋白質は、皮膚がん予防に重要な防御的働きをする。皮膚がんに関連する遺伝子は皮膚がんの種類によって異なり、これらの変異は、各々の皮膚がんの種類において重要な DNA の損傷と修復の種類を理解するてがかりを提供している。このように、集団における遺伝的感受性には大きな差がみられる。将来、遺伝子解析によって、リスクの高い個人を正確に特定できるかもしれない。

・紫外線によって誘発される免疫抑制は、皮膚がん発生の重大な要因である。ある患者では免疫修飾により、ウイルスの再活性化とワクチン効果の低下が引き起こされることがある。紫外線によって誘発された DNA 変異が修復されないと、皮膚がんへの抵抗性が減少し、腫瘍発生の重大な要因ともなる。ウイルス自体と免疫抑制双方への影響により、太陽紫外線ばく露は、潜伏性単純ヘルペスウイルスの再活性化を誘発し、ヘルペスの再発症を導く可能性がある。ヘルペスウイルスは、ヒトパピローマウイルス感染と関連するいくつかの皮膚がんや結膜上皮がん発達の共要因である。限られた証拠ではあるが、少なくとも遺伝的に病気にかかりやすい個人に対し、紫外線ばく露がワクチン効果を低下させる場合のあることが示されている。

・皮膚への UV-B ばく露により形成されるビタミン D (水酸化により活性ビタミンになる) は、いくつかの内臓がん、自己免疫疾患及びその他の疾患の発症に対して防御的役割を果たすと考えられる。多くの研究で、低レベルの太陽 UV-B ばく露と内臓がん(結腸がん、前立腺がんなど)や自己免疫疾患(多発性硬化症や I 型糖尿病など)のハイリスクを関連付けている。太陽光中の UV-B ばく露が不足するとビタミン D 量が至適レベル以下となることか

ら、ビタミン D はこれらの疾患の予防を補助する防御因子とされてきた。ただし、太陽 UV-B ばく露が防御的な役割を果たすことを示す証拠や、これにビタミン D が介在することを示す証拠は決定的なものではない。

・多量の太陽紫外線ばく露の悪影響から眼や皮膚を保護するための個人的な対策は、人々の間にますます広まりつつある。オーストラリア、カナダ、イギリス及びアメリカなどにおける健康キャンペーンは、太陽（紫外線）からの防御に関する一般の人々の認識を高めている。中緯度地域の白人の間で広く用いられている広域スペクトルの日焼け止めローションは、多量の太陽（紫外線）ばく露による日焼けを抑制している。角膜全体を覆う紫外線吸収性ソフトコンタクトレンズは、優れた保護効果により眼を太陽 UV-B から守り、着色サングラスに比べ側部や下部から侵入する紫外線を遮蔽できるという点で優れている。

・ビタミン D 合成に充分であり、しかも皮膚がんのリスクを増加させない最適な太陽 UV-B ばく露量について、統一基準を示すことは現実的ではない。個々の人間が浴びている太陽 UV-B 量は、時刻、緯度、高度、季節、雲量、活動そして着ている衣服のタイプによって大きく異なる。皮膚の色、年齢及び遺伝的な違いも、ばく露がプラスに作用するかマイナスに作用するかを決めるもう一つの重要な要因である。したがって、「安全な」太陽（紫外線）ばく露量は、個人及び居住地域次第である。

・オゾン層破壊と地球規模の気候変化の相互作用は、人間の健康に悪影響を及ぼすかもしれない。現在のところ、地球温暖化が、日光下の屋外で過ごす時間の長さに関して、特に中緯度に居住する人々の行動にいかなる変化をもたらすか予測することは不可能である。もし気温が上昇すると、人々の太陽紫外線ばく露量は現在より大きくなるだろう。このことは、ビタミン D にとっては好都合だが、皮膚がん及び白内障の発生と免疫系に悪影響を与えるだろう。

陸域生態系

・太陽 UV-B 照射量を増大又は低減させた野外研究によると、高等植物及び細菌類、菌類とその他の微生物に多くの影響があると報告されている。野外研究では、UV-B によって高等植物とコケ（蘚類）の光合成はほとんど影響を受けなかったが、高等植物及びコケ（蘚類）の成育や形態にはしばしば変化が見られた。これによって、茎や葉の生育が僅かに減少したり、植物種間での競合的バランスが変化したりする可能性がある。菌類や細菌類は、一般に UV-B による損傷への感受性が高等植物より高いが、種によってその感受性は異なる。この相違は、落葉落枝分解のようなプロセスに影響する微生物群の種構成に変化を及ぼす可能性がある。また、太陽光の UV-B 照射量を加減させる実験から、植物の化学組成物への変化が広く報告されている。

・UV-Bの増加はしばしば昆虫による植物組織の消費の大幅な低下をまねく。昆虫の行動変化によることもあるが、通常はUV-Bによって生じた植物の化学的及び物理的性質の変化が草食性の低下を引き起こすと説明される。このような変化は、植物と地上及び地下に生息するその他の生物との多くの相互作用に影響を及ぼす。そのメカニズムについて、現在ではより多くのことが解明された。

・土壌内に進入する太陽光の量は多くないが、植物の根系の生物量及び形態は、植物の茎や葉よりはるかに大きな影響を受ける。根の量は、UV-B照射量の増加によって大きく低下することがある。また、UV-Bによって誘発された土壌微生物群や生物量の変化や小型無脊椎動物の変化が報告されており、これらの変化は土壌中のミネラル栄養分の変化に重要な意味を持つ。これらの生態系レベルでの現象の多くは、植物の化学的・物理的性質や根からの浸出液の性質の組織的な変化の結果と考えられる。

・気温、二酸化炭素(CO₂)、湿度及び有効窒素のように広い範囲にわたり変化する他の環境因子とUV-Bが相互作用し、複雑な植物の反応を起こす可能性がある。いくつかの研究では、植物成育は高濃度のCO₂によって促進されたが、一方で、UV-Bによる影響の多くは、通常、CO₂の増加によって改善されることはない。しばしば、UV-Bによって植物の霜害耐性と極端に高い気温条件での生存性が増すが、逆に、極端な温度では、植物のUV-B感受性が影響を受ける場合もある。干ばつに抵抗性のある植物は、強いUV-Bに対してより抵抗性を持つ傾向がある。さらに、UV-Bは水ストレス(植物体の水分不足)症状を軽減すると報告されている。生物が利用可能な窒素は、人間活動のため多くの地域で過去のレベルを超えており、窒素が充分供給された植物は、UV-Bに対して一般的により影響を受けやすいという研究もある。

・UV-Bへの植物の反応に介在している基礎メカニズムについて新たな理解が進んできている。UV-Bは、まだ性質が解明されていない受容体分子の活性化をもたらす。初期に起こるこれらの現象は、植物の遺伝子発現と反応の変化にいたる伝達経路を活性化させる。UV-Bへのばく露は、UV-Bに特異的な信号と、他の環境因子によって引き起こされるものと共通の要素を持つ信号とを誘発する。その共通の信号要素を使用することで、遺伝子発現と機能的反応においてオーバーラップが生じる。こうした新しい知識は、植物のUV-Bに対する共通した反応(成長の遅れ、UV-B照射量増加への順応、植物と植物消費生物との相互関係など)を理解するために有用である。また、植物の成育や機能への様々な環境ストレスの相互作用への理解を助ける。

・生物作用スペクトル関数(BSWF)の使用に関する技術的な問題点がさらに解明された。BSWFは、異なる波長ごとに割り当てられた増幅係数であり、相対的な生物学的影響量の

目安となる。BSWF は、屋外及び制御環境下の施設内の両方において、生物を紫外線にばく露させる実験を適切に実施・解釈するために重要である。BSWF の特性は、成育、DNA 損傷、酸化的損傷や二次代謝産物の変化の誘導といった、植物がもつ様々なプロセスの間で大きく異なる。したがって、単一の BSWF を植物や生態系の反応に使用することは適切でない。

水圏生態系

・最近の野外研究によると、現状の太陽 UV-B 照射量でさえ、水生生物に悪影響を与える可能性のあることが引き続き示されている。UV-B にばく露されると、植物プランクトンと、魚卵、稚魚、動物プランクトン及びその他の第一次及び第二次消費生物の生産性の低下と生殖機能障害及び発育障害が生じることが示されている。UV-B 照射に伴う生物生産性の低下は、食物連鎖のすべての段階を通して伝達されると同時に、種の構成及び生態系の構造や機能に変化を起こす可能性がある。また一次生産の減少は、大気中の二酸化炭素の吸収容量の減少と関連して気候変化に影響をもたらす可能性がある。

・大規模な閉鎖空間での実験によると、生態学的には、水生生物の群落構造の変化の方が、UV-B 増加による藻類バイオマス全体量に対する影響よりも重要である。メソコスム(大型の擬似現場実験水槽)実験では、様々なレベルのオゾン層破壊を模擬するため、プランクトン群落への紫外線照射レベルを調節できる。深度を固定した実験では、現在のレベルの紫外線照射量ではプランクトンの成長が阻害されたが、海水の鉛直混合によってさまざまなレベルの紫外線にプランクトンをばく露させた実験では、成長は阻害されなかった。メソコスム実験を模した総合的なモデルによると、UV-B 照射量の増加は、群落レベルで一次生産生物から細菌への転換を起こしている可能性がある。群集構造における転換は、海洋表層水での二酸化炭素濃度に重大な影響を及ぼす可能性がある。

・最近の研究により、水圏生物の UV-B 防御メカニズムへの理解が進んだ。紫外線は、光合成や窒素固定を減じ、DNA を損傷するが、大部分の植物プランクトンは、紫外線吸収物質、回復酵素及び活性酸素種排除機構などの緩和機能を発達させている。しかし、紫外線に対する防御は完全でない。ピコプランクトンサイズのシアノバクテリアは、紫外線吸収物質を生産せずに、速い細胞分裂によって紫外線の影響を回避している。最近になって、これらの生物は広く水圏に存在し、生息水域での生産性に 50%以上寄与していることがわかった。また、太陽紫外線は、干満帯における大型藻類の鉛直分布を規定している。そのうち上部干満帯の生物では、効果的な遮蔽及び修復機構が発達している。

・UV-B による第一次生産生物バイオマスの減少は、水圏の食物連鎖の高次に位置する消費生物の成長と生存にマイナスの影響を及ぼす。カイアシ類や他の動物プランクトン、サ

ンゴ及びウニを含む広範囲にわたる消費生物のそれぞれの種に対して特有なそして直接的な UV-B の影響が確認されている。

・自然の生息環境において、動物プランクトンは、UV-B へのばく露や地球規模の気候変化要因などの、相反する淘汰圧力に直面している。無脊椎捕食動物は、昼間に動物プランクトンの表層への移動を引き起こし、水面近くで動物プランクトンは高レベルの紫外線にさらされる。鉛直移動と紫外線遮蔽とは別に、動物プランクトンは、UV-B に誘発された DNA 損傷を光回復に頼っている。気候変化に伴う水温の上昇により、酵素活性が増大され、光回復が促進されることが予測される。

・魚類個体群減少の主な原因は、捕食と幼稚魚の食料不足である。しかし、幼稚魚が増加した UV-B にさらされることが、減少傾向をさらに増大している可能性がある。その他の主な要因として、乱獲、地球規模の気候変化による水温上昇、水質汚染や病気が挙げられる。生息海域の特性が不明確であり幼稚魚の自然死亡率が高いため、それぞれの魚種に対する UV-B の影響についての定量的評価は困難である。

・水圏生態系の溶存有機物の濃度と化学組成が、水層内の紫外線の透過率を決定付ける。紫外線照射量は、プランクトン群集の種の構成に影響し、それに伴い溶存有機物(DOM)濃度に影響する。河川に生息しているプランクトン群集とその後背地に生息している陸域植物群集の初期遷移の間には強い関連性があり、さらにその関連性は気候変化によって影響を受ける。その結果、気候変化と紫外線は、湖沼のプランクトンの種の組成に影響を与えたり、輸入種の侵入可能性を増加させたりする潜在的な危険性がある。

生物地球化学的循環

・気候に関連した変化は、陸域から淡水・沿岸生態系への有機物移動を変化させ、それによって紫外線の水中への透過に影響を与え、水圏生物地球化学的プロセスに大きな影響を与える。これらの変動は、高緯度の系では特に一般的である。陸域生態系から浸出又は、流れ出した溶存有機物は、小川、川、湖水、最後に海洋に流入する。有色溶存有機物は、水域への紫外線の透過率を調節するが、同時に太陽紫外線によって光分解され、CO₂を主とする無機小分子を放出する。

・将来表層水温が上昇すると、湖及び海洋の階層化が促進され、表層の生物地球化学に対する UV-B の影響が増大する。この重大な影響は、階層化されている水圏環境の上層における水の UV-B の透過量が大幅に増加することによって引き起こされる。気候変化によるこれらの影響は、水域上層における生物地球化学的循環に対する UV-B の影響を増加させ、それによってオゾン回復の好影響を部分的に打ち消してしまう。

・気候変化と UV-B 照射量の変化は、大気中でのオゾンの化学変化に関与しているハロゲン含有化合物の濃度に影響する。例えば高等植物からの臭化メチルの放出などのハロゲン含有化合物の放出は気温上昇とともに増加する。最近の測定では、大気中の臭化メチルの濃度は1年当たり 2.5~3.0% ずつ減少しているが、将来的な地球温暖化により現在の減少率は鈍化すると予想される。臭素やその他のハロゲンラジカルは、海洋境界層に存在する大気エアロゾルと表層水の両方におけるハロゲン含有化合物に対して UV-B 照射が引き起こす反応を通じて生み出される。これらのハロゲン含有化合物は対流により、オゾン層破壊に臭素ラジカルが関与している上部対流圏へ輸送されると考えられる。

・UV-B は、水圏環境における金属の生物学的利用性及び毒性を変える可能性がある。多くの微量元素は必須微量栄養物であるが、全ての金属は一定濃度を超えると有毒である。しかしながら、太陽光を受けた表層水には、金属類はしばしば生物が利用できない形態で存在する。UV-B 照射量の増加により、金属の化学形態を、水生生物が利用可能な形態に変えることもある。例えば、水銀元素は紫外線によって酸化され、水圏食物連鎖の生物蓄積を通してヒトの健康に悪影響を与えるメチル水銀の前駆体が生成される。

・紫外線は、海洋硫黄循環に関与する光化学反応を推進し、大気エアロゾルの生成や雲形成につながる。ジメチルスルフィド(DMS)の海洋放出は、大気放射と気温に影響する大気エアロゾルを生み出す。紫外線による形態変化は、海洋上部における DMS の重要な吸収源である。また、海洋上部でのもう一つの重要な硫黄化合物である硫化カルボニルは、有色溶存有機物(CDOM)が関与する UV-B の誘発反応により生成される。

・陸域系では、UV-B 照射は、分解や土壌生物学的な変化を通して炭素及び栄養物の循環に影響を与える可能性がある。太陽 UV-B へのばく露は、特に乾燥気候帯で、枯れた植物の直接光分解を引き起こす。植物が UV-B にばく露されると、植物根浸出物や枯れた植物の化学変化により土壌生物と生物地球化学に影響する。UV-B によって誘発された炭素及び栄養物の循環の変化は、気候変化への反応との相互作用によって、生態系の長期的炭素収支に影響を与えることも考えられる。

大気質

・モデルと観測値によると、成層圏から対流圏へのオゾンの移動が過去 30 年間に約 30% 減少した可能性がある。地上近くの大気質の重要な指標の一つである。対流圏のオゾン濃度は、UV-B 照射量や局地的な天候システム・汚染物質濃度によって影響を受けている。また、成層圏のオゾン層破壊により UV-B 照射量が強まった結果、対流圏におけるオゾン発生率は増加したが、成層圏から対流圏へ移動するオゾン量は減少した。

・今後予測されている成層圏オゾンの増加は、対流圏温度を上昇させ、大気境界層のオゾン濃度を増加させるかもしれない。モデルによると、大気境界層のオゾン濃度が 2000～2100 年の間に、気候変化、大気汚染、成層圏オゾンの増加といった複合効果により地球全体で 33～100%増加することが予測されている。しかし、この増加による気候への影響は、対流圏のオゾン濃度が空間的にも時間的にも非常に変動的であるため、定量化することは困難である。

・UV-B 照射量の変動によって起こる対流圏の水酸化ラジカル濃度の変動は、現在ではうまく定量化されるようになった。対流圏の水酸化ラジカル(OH)は、大気中における主要な酸化剤の一つで、オゾン層破壊、気候変化及び都市部の大気汚染に関与する大気微量成分を破壊する。地球全体の OH 平均値は、長期間ではなく、短期間(月～年単位)の変動について観察されてきた。最近の比較的清浄な地域における 5 年以上の観測値では、OH 濃度は太陽紫外線の強度によって予測が可能である。もし、この関係が今後の観測でも確認されるなら、このアプローチは、紫外線観測を利用して、種々の化学状態での対流圏の酸化効率の特性化に用いることができ、大気質の評価を単純化できるだろう。

・大気圏の酸化能に対するオゾン量変化の影響を推定するモデルについて、非汚染地域対象のものは信頼性が高まってきた。紫外線照射量の観測値と、下層大気中の OH を含む化学組成物の測定値は、現在では化学モデルと通常は一致し、非汚染大気中で晴天時及び一定の雲量時ともに測定精度内にある。しかし、中度及び重度に汚染された都市区域又は森林環境では、モデルと測定値は一致しない。このようなモデルの不確実性は、特に大気汚染の可能性のある区域において、対流圏オゾンの局地的測定の重要性を示している。

・南極における地表でのオゾン観測値の分析によると、成層圏オゾン層破壊の結果として、この地域の対流圏に有意な化学的変化があることが示唆されている。対流圏のオゾン濃度の観測値によると、最近(1990 年以降)、オゾンホール出現中に地表に達する紫外線照射量の増加及び氷層からの一酸化窒素(NO_x)の発生増加と一致して、地表オゾン濃度が増加している。このように、南極の下層大気は、オゾンホール発達以前に比べ、酸化能力が強くなっていると推測され、金属の生物学的利用率の変動を通して悪影響をもたらすことも考えられる。

・強力な温室効果ガスであり、トリフルオロ酢酸の主要な人為的発生源として知られている HFC-134a の対流圏濃度は急速に増えている。HFC-134a 濃度の増加は、既知の使用量及び大気中の損失プロセスと一致している。1998～2002 年の両半球での観測によると、HFC-134a 濃度は年間 12%まで増加している。これまでの観測値と、既知の発生源及び吸収源との間の良好な一致は、トリフルオロ酢酸の環境での蓄積予測への信頼性を高めている。

る。HFC-134a 濃度の増加は、気候変化を加速することも考えられる。

・ハイドロクロロフルオロカーボン(HCFCs)とハイドロフルオロカーボン(HFCs)の大気分解で生じる物質が、人類及び環境に与えるリスクは最小限と考えられる。これらの化合物には、トリフルオロ酢酸(TFA)とクロジフルオロ酢酸が含まれる。最近の研究によっても、現在の淡水及び海水への環境負荷による環境リスク及び健康リスクは小さいとする結論が得られている。また、気候変化と、HCFCs 及び HFCs の継続利用のため、これらの化合物の量が将来も増加し続けると予想されるが、現在の情報では重要な問題ではないことが示されている。

・HCFC 代替物として提案されているペルフルオロポリエーテルは非常に大きな地球温暖化係数を持ち、大気中の化学分解に対しても高い安定性を示している。この化合物は通常、工業用熱伝導流体として用いられている。これらの物質が地球温暖化やそのオゾン層破壊との相互作用に大きく影響を与えているかどうかは知られていないが、これらのリスクは今後さらに評価されるべきである。

材料への損傷

・太陽紫外線にさらされたプラスチックや木材は、時間の経過とともに有用な特性を失うといった劣化を生じる。この損傷は、照射量に依存しており、多くの材料の屋外での耐用年数を規定する。損傷は、高温、高湿、そして大気汚染物質の存在によって加速する。そのため、太陽紫外線による材料損傷を抑制するために、光安定剤や表面塗装剤が広く用いられている。紫外線レベルが高ければ、高レベルの安定剤を必要とするため、屋外で使用する材料のコストが高くなる。

・いくつかの新規紫外線安定剤と、紫外線耐性を改良するための製品製造技術が報告されている。ポリマー(重合体)に結合しているため浸出による損失が少ないと思われる安定剤化合物のように、効果的な光安定剤の新規改良型が最近報告されている。安定剤配合の相乗効果メカニズムがさらに解明されており、新規の光安定剤配合の改良に貢献するであろう。この分野での継続的な研究が、太陽 UV-B にばく露した材料をより強力に保護できる方法の開発に貢献するだろう。

・ナノスケール添加剤を使用する最新の傾向は、プラスチック製品の紫外線安定性を改善するかもしれない。ナノスケール添加剤は、従来の添加剤に比べ、より小さい平均粒子サイズで、多くの場合良好な物理的性質を持っている。初期のデータによれば、いくつかのナノスケール添加剤は、良質な光安定剤としても作用し、屋外の紫外線にさらされる製品の耐用年数を延長させることが示されている。しかし、これらの添加剤と、従来の光安定

剤又は酸化防止剤や難燃剤などのその他の添加剤との相互作用については、まだ完全には評価されていない。

・プラスチックの添加剤として粉末化した木材の使用について研究が続けられている。これらの添加剤の紫外線安定性に対する効果は、使用する木材の種類によって異なる。粉末化した木材やその他の植物資材は、屋外での使用を意図したいくつかのプラスチック製品のための低コストの天然添加剤として使用されている。最近の研究では、これらの植物由来添加剤のいくつかは、天然充填材の材料、又はその材料に用いられた処理方法によって、光損傷を促進する場合もあれば、光安定化として作用する場合もあると指摘されている。しかし、木材添加剤に含有されるリグニンは太陽 UV-B を吸収し、ポリマー成分の光損傷を促進する。したがって、充填したポリマーの光安定性を損なわない、生物由来添加剤の原料と処理技術を特定することは、屋外で使用する低コストで紫外線安定性のあるプラスチック製品につながると考えられる。

4. IPCC/TEAP 特別報告要旨(2005年)

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化に影響を与える温室効果ガスでもある。(図 4-15 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化に影響することも考えられる。また、気候変化が間接的にオゾン層に影響を与えることもある。

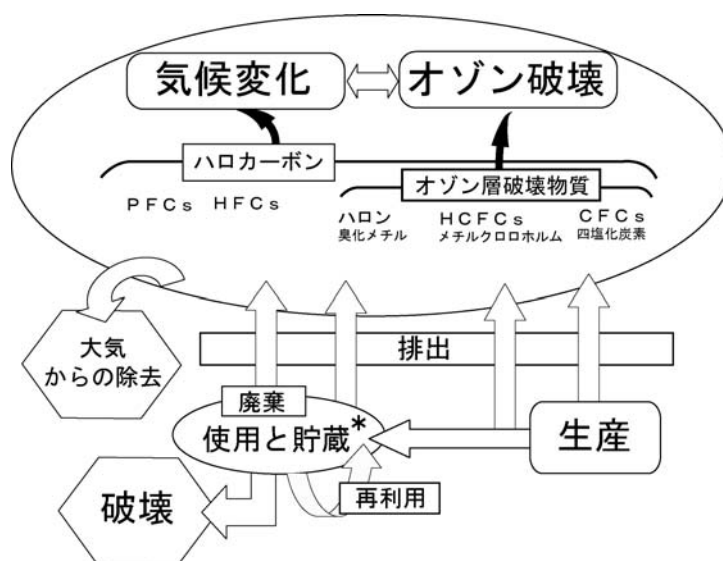


図 4-15 本報告書で扱う主要な問題の概念図

CFC、ハロンと HCFC はオゾン破壊と気候変化の原因となる。一方、HFC と PFC は気候変化のみの原因となり、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。

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。

* 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。

2. ハロカーボン、オゾン層破壊、気候変化

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 4-16 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、 $0 \sim -3\%$ /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、 $1 \sim 3\%$ /年、 $3 \sim 7\%$ /年、 $13 \sim 17\%$ /年）。

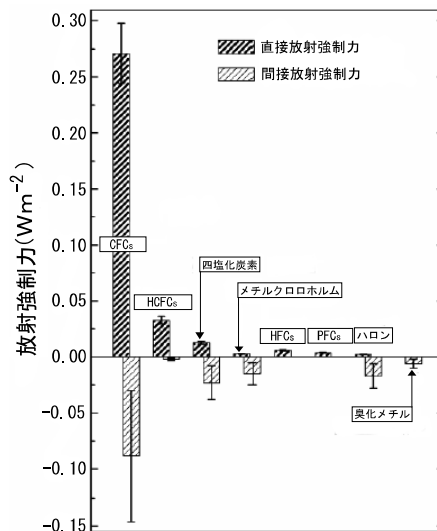


図 4-16 1750 年～2000 年のハロカーボン類の変化による直接及び間接放射強制力
縦線は標準偏差の 2 倍を示す ($\pm 2\sigma$)。

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 4-16 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

* 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 (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。

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つの異なる気候変化メカニズムであり、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4-16参照)。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、気候変化及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CO₂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CO₂換算排出量は、1990年頃に年間約 $7.5 \pm 0.4 \text{Gt-CO}_2$ であったのが、2000年頃には年間約 $2.5 \pm 0.2 \text{Gt-CO}_2$ 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CO₂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^{-2} 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^{-2} 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 4-17 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、気候変化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。

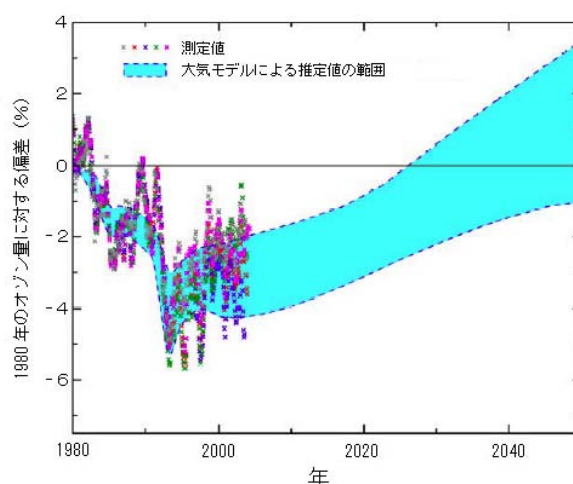


図 4-17 中低緯度(60°S-60°N)におけるオゾン量の偏差 (%) の推移

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。 ※同一の図は本文 P119 にも引用されている。

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 4-18 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。

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。

※本表の GWP 値については本特別報告中のものであるので、最新の GWP 値については本文 P141 を参照のこと。

表 4-18 ハロカーボン類の GWP (IPCC/TEAP 特別報告要旨 (2005 年) 付属資料)

ガス	直接的放射強制力によるGWP ^a	間接的放射強制力によるGWP ^b (2005年の排出)	寿命 (年)	UNFCCCの 報告 ^c GWP
CFCs				
CFC-12	10,720 ± 3750	-1920 ± 1630	100	n.a. ^d
CFC-114	9880 ± 3460	n.a.	300	n.a. ^d
CFC-115	7250 ± 2540	n.a.	1700	n.a. ^d
CFC-113	6030 ± 2110	-2250 ± 1890	85	n.a. ^d
CFC-11	4680 ± 1640	-3420 ± 2710	45	n.a. ^d
HCFCs				
HCFC-142b	2270 ± 800	-337 ± 237	17.9	n.a. ^d
HCFC-22	1780 ± 620	-269 ± 183	12	n.a. ^d
HCFC-141b	713 ± 250	-631 ± 424	9.3	n.a. ^d
HCFC-124	599 ± 210	-114 ± 76	5.8	n.a. ^d
HCFC-225cb	586 ± 205	-148 ± 98	5.8	n.a. ^d
HCFC-225ca	120 ± 42	-91 ± 60	1.9	n.a. ^d
HCFC-123	76 ± 27	-82 ± 55	1.3	n.a. ^d
HFCs				
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	- ^e
HFC-365mfc	782 ± 270	~0	8.6	- ^e
HFC-32	670 ± 240	~0	4.9	650
HFC-152a	122 ± 43	~0	1.4	140
PFCS				
C ₂ F ₆	12,010 ± 4200	~0	10,000	9200
C ₆ F ₁₄	9140 ± 3200	~0	3200	7400
CF ₄	5820 ± 2040	~0	50,000	6500
ハロン				
ハロン-1301	7030 ± 2460	-32,900 ± 27,100	65	n.a. ^d
ハロン-1211	1860 ± 650	-28,200 ± 19,600	16	n.a. ^d
ハロン-2402	1620 ± 570	-43,100 ± 30,800	20	n.a. ^d
その他のハロカーボン				
四塩化炭素(CCl ₄)	1380 ± 480	-3330 ± 2460	26	n.a. ^d
1,1,1-トリクロロエタン (CH ₃ CCl ₃)	144 ± 50	-610 ± 407	5.0	n.a. ^d
臭化メチル(CH ₃ Br)	5 ± 2	-1610 ± 1070	0.7	n.a. ^d

n.a. はnot available (該当なし) のこと。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CO₂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 (±2σ) 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。

5. 引用文献

- 秋吉英治、坂本圭、永島達也、高橋正明、今村隆史：「CCSR/NIES 化学気候モデルを用いたオゾン層の将来予測実験」，日本地球惑星科学連合 2007 年大会予稿集 CD-ROM、F207-209 (2007)
- 環境省：「化学物質ファクトシート (2008 年度版)」，2009.
- 環境省：「紫外線環境保健マニュアル」，2008.
- 環境省：「平成 17 年度フロン等オゾン層影響微量ガス等監視調査」，2006.
- 環境省：「平成 21 年度フロン等オゾン層影響微量ガス等監視調査」，2010.
- 気象庁：オゾン層観測報告，1993-2010.
- 気象庁：大気・海洋環境観測報告 (2000 年観測成果) ，2002.
- ハロン等抑制対策連絡会：ハロン等抑制対策に関する報告書 (平成 21 年度)，2010.
- Andrady, A.L., Hamid, H.S., & Torikai, A. (2003). Effects of climate change and UV-B on materials. *Photochemical & Photobiological Science*, 2, 68-72.
- Bain, J.A., Rusch, M.D., & Kline, M.S. (1943). The effect of temperature upon ultraviolet carcinogenesis with wave lengths 2,800-3,400 Å. *Cancer Research*, 3, 610-612.
- CGER. (2007). *CGER's supercomputer activity report*, vol14-2005.
- Charlson, R.J., Lovelock, J.E., Andreae, M.O., & Warren, S.G. (1987). Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326, 655-661.
- Chipperfield, M.P., & Feng, W. (2003). Comment on: Stratospheric ozone depletion at northern mid-latitudes in the 21st century: The importance of future concentrations of greenhouse gases nitrous oxide and methane. *Geophysical Research Letters*, 30 (7), 1389, doi:10.1029/2002GL016353.
- Estupinan, G., Raman, S., Crescenti, G.H., Streicher, J.J., & Barnard, W.F. (1996). Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *Journal of Geophysical Research*, 101, 16807-16816.
- European Commission. (2003). *Ozone-climate interactions: Air pollution research report 81*.
- Fusco, A.C., & Logan, J.A. (2003). Analysis of 1970-1995 Trends in tropospheric ozone at northern hemisphere midlatitudes with the GEOS-CHEM model. *Journal of Geophysical Research*, 108(D15), 4449. doi:10.1029/2002JD002742.
- Giovannucci, E., Liu, Y., Rimm, E.B., Hollis, B.W., Fuchs, C.S., Stampfer, M.J., & Willett, W.C. (2006). Prospective study of predictors of vitamin D status and cancer incidence and mortality in men. *Journal of the National Cancer Institute*, 98, 451-459.
- Grant, W.B. (2006). *Sunlight, highly cited and/or important papers on vitamin D and cancer*. Nutrition And Health Research Center.
[http://www.sunarc.org/603-Highly cited vitamin D, cancer.doc](http://www.sunarc.org/603-Highly%20cited%20vitamin%20D,%20cancer.doc)

- Hayashi, L.C., Hayashi, S., Yamaoka, K., Tamiya, N., Chikuda, M., & Yano, E. (2003). Ultraviolet B exposure and type of lens opacity in ophthalmic patients in Japan. *Science of the Total Environment*, *302*, 53-62.
- Hidema, J., Teranishi, M., Iwamatsu, Y., Hirouchi, T., Ueda, T., Sato, T., Burr, B., Sutherland, B.M., Yamamoto, K., & Kumagai, T. (2005). Spontaneously occurring mutations in the cyclobutane pyrimidine dimer photolyase gene cause different sensitivities to ultraviolet-B in rice. *the Plant Journal*, *43*, 57-67.
- Kelfkens, G., Bregman, A., de Gruijl, F.R., van der Leun, J.C., Piquet, A., van Oijen, T., Gieskes, W.W.C., van Loveren, H., Velderes, G.J.M., Martens, P., & Slaper, H. (2002). Ozone layer - climate change interactions. Influence on UV levels and UV related effects. *Dutch National Programme on Global Air Pollution and Climate Change*, Report No.410200112. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment.
- Lumsden, P. (1997). *Plants and UV-B: Responses to environmental change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Meyer, C. (2004). 健康に重大な影響を及ぼすビタミン D 欠乏症. *The Journal of American Medical Association (日本語版)*, 2004-11, 26-29.
- Neale, P.J., & Kieber, D.J. (2000). Assessing biological and chemical effects of UV in the marine environment: Spectral weighting function. In Hester, R.E. & Harrison, R.M (Eds.), *Causes and Environmental Implications of Increased UV-B radiation* (61-83). Cambridge: Royal society of Chemistry.
- NOAA. (2005). *Northern hemisphere winter summary 2004-2005*.
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/winter_bulletins/nh_04-05/index.html
- Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M.D., Randel, W.J., Santer, B.D., Soden, B.J., & Stenchikov, G.I. (2006). Anthropogenic and natural influences in the evolution of lower stratospheric cooling. *Science*, *311*, 1138-1141.
- Ravishankara, A.R., Daniel, J.S., & Portmann, R.W. (2009). Nitrous Oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st Century. *Science*, *326*, 123-125.
- Rohrer, F., & Berresheim, H. (2006). Strong correlation between levels of tropospheric hydroxyl radicals and solar ultraviolet radiation. *Nature*, *442*, 184-187.
- Sasaki, M., Takeshita, S., Oyanagi, T., Miyake, Y., & Sakata, T. (2002). Increasing trend of biologically active solar ultraviolet-B irradiance in mid-latitude Japan in the 1990s. *Optical Engineering*, *41* (12), 3062-3069.
- Sudo, K., Takahashi, M., & Akimoto, H. (2003). Future changes in stratosphere-troposphere exchange and their impacts on future tropospheric ozone simulations. *Geophysical Research Letters*, *30*, 2256, doi:10.1029/2003GL018526.
- Takahashi, S., Nakajima, N., Saji, H., & Kondo, N. (2002). Diurnal change of cucumber CPD photolyase gene (CsPHR) expression and its physiological role in growth under UV-B irradiation. *Plant & Cell Physiology*, *43*, 342-349.
- Tatarov, B., Nakane, H., Park, Ch.B., Sugimoto, N., & Matsui, I. (2009). Lidar observation of long-term trends and variations of stratospheric ozone and temperature over Tsukuba, Japan. *International Journal of Remote Sensing*, *30*, 15,

3951-3960.

UNEP. (1989). *Environmental effects panel report*.

UNEP. (1995). *Environmental effects of ozone depletion: 1994 assessment*.

UNEP. (1999). *Environmental effects of ozone depletion: 1998 assessment*.

UNEP. (2003). *Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2002 assessment*.

UNEP (2005). *Production and consumption of ozone depleting substances under the Montreal Protocol 1986-2004*.

UNEP. (2007). *Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2006 assessment*.

UNEP/WMO (2007). *Scientific assessment of ozone depletion: 2006*.

Van der Leun, J.C., & de Gruijl, F.R. (2002). Climate change and skin cancer. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 1, 324-326.

West, S.K., Longstrth, J.D., Munoz, B.E., Pitcher, H.M. & Duncan, D.D. (2005). Model of risk of cortical cataract in the US population with exposure to increased ultraviolet radiation due to strtspheric ozone depletion. *American Journal of Epidemiology*, 162 (11), 1080-1088.

WHO, WMO, UNEP, & NIR. (2002). *Global solar UV index - A practical guide*.

6. 英略語一覧

英略語	正式名称	訳
AGAGE	Advanced Global Atmospheric Gases Experiment	先進的地球規模大気中気体成分観測
AOGCM	Coupled Oceanatmosphere General Circulation Models	大気海洋結合モデル
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	改良型高解像度放射計
BAPMoN	Background Air Pollution Monitoring Network	大気バックグラウンド汚染監視網
BCC	Basal Cell Carcinoma	基底細胞がん
BSWF	Biological Spectral Weighting Functions	生物作用スペクトル関数
CCM	Chemistry-Climate Model	化学 - 気候モデル
CCSR	Center for Climate System Research	東京大学気候システムセンター
CDOM	Colored Dissolved Organic Matter	有色溶存有機物
CEOS	Committee for Earth Observation Satellites	地球観測衛星委員会
CFC	Chlorofluorocarbon	クロロフルオロカーボン
CGER	Center for Global Environmental Research	国立環境研究所地球環境研究センター
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage	国際照明委員会
CLAES	Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer	大気測定用走査型冷却剤冷却式地球周縁赤外分光計
DLR	Deutschen Zentrum fur Luft- und Raumfahrt	ドイツ航空宇宙センター
DMS	Dimethylsulphide	ジメチルスルフィド
DOC	Dissolved Organic Compounds	溶存有機物
DU	Dobson Unit	ドブソン単位
ECD	Electron Capture Detector	電子捕獲型検出器
EEAP	Environmental Effects Assessment Panel	環境影響評価パネル
EESC	Equivalent Effective Stratospheric Chlorine	等価実効成層圏塩素
ESA	European Space Agency	ヨーロッパ宇宙機関
ESRL	Earth System Research Laboratory	地球システム研究所
GAW	Global Atmosphere Watch	全球大気監視計画
GC	Gas Chromatograph	ガスクロマトグラフ
GHG	Greenhouse Gas	温室効果ガス
GO ₃ OS	Global Ozone Observing System	全球オゾン観測システム
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment	全球オゾン監視実験
GWP	Global Warming Potential	地球温暖化係数
HALOE	Halogen Occultation Experiment	ハロゲン気体分子測定センサー
HALS	Hindered Amine Light Stabilizer	高分子光安定剤
HBFC	Hydrobromofluorocarbon	ハイドロブロモフルオロカーボン
HCFC	Hydrochlorofluorocarbon	ハイドロクロロフルオロカーボン
HFC	Hydrofluorocarbon	ハイドロフルオロカーボン
IARC	International Agency for Research on Cancer	国際がん研究機関
IGY	International Geophysical Year	国際地球観測年
ILAS	Improved Limb Atmospheric Spectrometer	改良型大気周縁赤外分光計

IMG	Interferometric Monitor for Greenhouse Gases	温室効果ガス干渉分光計
IOC	International Ozone Commission	国際オゾン委員会
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	気候変動に関する政府間パネル
LIMS	Limb Infrared Monitor of the Stratosphere	地球周縁太陽掩蔽方式成層圏大気観測放射計
MLS	Microwave Limb Sounder	マイクロ波リム放射サウンダー
MRI	Meteorological Research Institute	気象研究所
MS	Mass Spectrometer	質量分析計
NASA	National Aeronautics and Space Administration	アメリカ航空宇宙庁
NDACC	Network for the Detection of Atmospheric Composition Change	大気組成変化検出のためのネットワーク
NIES	National Institute for Environmental Studies	国立環境研究所
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	アメリカ海洋大気庁
ODP	Ozone-Depleting Potential	オゾン層破壊係数
ODS	Ozone-Depleting Substance	オゾン層破壊物質
OMI	Ozone Monitoring Instrument	オゾン監視装置
PAR	Photosynthetically Active Radiation	光合成有効放射
PFPE	Perfluoropolyether	パーフルオロポリエーテル
PRTR	Pollutant Release and Transfer Register	化学物質排出移動量届出制度
PSC	Polar Stratospheric Cloud	極域成層圏雲
QBO	Quasi biennial Oscillation	準2年周期振動
QPS	Quarantine and Pre-Shipement	検疫・出荷前処理
SAG	Scientific Advisory Group	科学諮問部会
SAGE	Stratospheric Aerosol and Gas Experiment	太陽掩蔽型成層圏エアロゾル・オゾン鉛直分布観測センサー
SBUV	Solar and Backscatter Ultraviolet	太陽・後方散乱紫外分光計
SCC	Squamous cell carcinoma	有棘細胞がん
SRES	Special Report on Emissions Scenarios	排出シナリオに関する特別報告
STE	Stratosphere-Troposphere Exchange	成層圏-対流圏交換
TEAP	Technology and Economic Assessment Panel	技術・経済評価パネル
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer	オゾン全量マッピング分光計
TOVS	Tiros Operational Vertical Sounder	気温、湿度の鉛直分布測定用放射計
UCI	University of California at Irvine	カリフォルニア大学アーバイン校
UNEP	United Nations Environmental Programme	国連環境計画
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change	国連気候変動枠組条約
VSLs	Very Short-Lived Substances	極短寿命物質
WHO	World Health Organization	世界保健機関
WMO	World Meteorological Organization	世界気象機関
WOUDC	World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre	世界オゾン・紫外日射データセンター