

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	2010年科学評価 パネル 大気中寿命(年)	オゾン破壊係数		地球温暖化係数 第4次IPCC報告書 (100年GWP値*)	
				モントリオール 議定書附属書	2010年科学 評価パネル		
附属書 A	グループⅠ (クロロフル オロカーボ ン)	CFC-11	45	1	1	4,750	
		CFC-12	100	1	0.82	10,900	
		CFC-113	85	0.8	0.85	6,130	
		CFC-114	190	1	0.58	10,000	
		CFC-115	1020	0.6	0.57	7,370	
	グループⅡ (ハロン)	ハロン-1211	CF ₂ BrCl	16	3	7.9	1,890
		ハロン-1301	CF ₃ Br	65	10	15.9	7,140
		ハロン-2402	C ₂ F ₄ Br ₂	20	6	13	1,640
	附属書 B	グループⅠ (その他の CFC)	CFC-13	640	1	-	14,400
			CFC-111	-	1	-	-
CFC-112			-	1	-	-	
等10物質			-	-	-	-	
グループⅡ		四塩化炭素	CCl ₄	26	1.1	0.82	1,400
グループⅢ		1,1,1-トリクロロエタン	CH ₃ CCl ₃	5	0.1	0.16	146
附属書 C		グループⅠ (ハイドロク ロフルオロ カーボン)	HCFC-21	1.7	0.04	-	-
			HCFC-22	11.9	0.055	0.04	1,810
			HCFC-123	1.3	0.02-0.06	0.01	77
			HCFC-124	5.9	0.02-0.04	-	609
	HCFC-133		-	0.02-0.06	-	-	
	HCFC-141b		9.2	0.11	0.12	725	
	HCFC-142b		17.2	0.065	0.06	2,310	
	HCFC-225ca		1.9	0.025	-	122	
	HCFC-225cb		5.9	0.033	-	595	
	等40物質		-	-	他	-	
	グループⅡ (ハイドロブ ロモフルオ カーボン)	HBFC-22B1 等34物質	CHF ₂ Br	-	0.74 他	-	-
	グループⅢ	ブロモクロロメタン	CH ₂ BrCl	0.4	0.12	-	-
	附属書E	臭化メチル	CH ₃ Br	0.8	0.6	0.66	5

* 「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	2010年科学評価 パネル 大気中寿命 (年)	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	222	0	11,700	14,800
	HFC-32	CH ₂ F ₂	5.2	0	650	675
	HFC-41	CH ₃ F	2.8	0	150	-
	HFC-125	CHF ₂ CF ₃	28.2	0	2,800	3,500
	HFC-134	CHF ₂ CHF ₂	9.7	0	1,000	-
	HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	13.4	0	1,300	1,430
	HFC-143	CH ₂ FCHF ₂	3.5	0	300	-
	HFC-143a	CH ₃ CF ₃	47.1	0	3,800	4,470
	HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1.5	0	140	124
	HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	38.9	0	2,900	3,220
	HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	242	0	6,300	9,810
	HFC-245ca	CH ₂ FCF ₂ CHF ₂	6.5	0	560	-
	HFC-43-10mee 等	CF ₃ CHFCHFCF ₂ CF ₃	16.1	0	1,300	1,640
	パーフルオロカーボン (PFC)	PFC-14	CF ₄	>50,000	0	6,500
PFC-116		C ₂ F ₆	>10,000	0	9,200	12,200
PFC-218		C ₃ F ₈	2,600	0	7,000	8,830
PFC-c318		c-C ₄ F ₈	3,200	0	8,700	10,300
PFC-31-10		C ₄ F ₁₀	2,600	0	7,000	8,860
PFC-41-12		C ₅ F ₁₂	4,100	0	7,500	9,160
PFC-51-14		C ₆ F ₁₄	3,100	0	7,400	9,300
等						
六フッ化硫黄	六フッ化硫黄	SF ₆	3,200	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	2010年科学評価 パネル 大気中寿命(年)	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	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7.7	1,030
	HFC-365mfc	CH ₃ CF ₂ CHFCF ₂ CF ₃	8.7	794
パーフルオロ化合物	NF ₃	NF ₃	500	17,200
	PFC-9-1-18	C ₁₀ F ₁₈	-	>7,500
	トリフルオロメチルサルファーヘキサフルオライド*	SF ₅ CF ₃	650-950	17,700
フルオロエーテル	HFE-125	CHF ₂ OCF ₃	11.9	14,900
	HFE-134	CHF ₂ OCHF ₂	24.4	6,320
	HFE-143a	CH ₃ OCF ₃	4.8	756
	HCFE-235da2	CHF ₂ OCHClCF ₃	3.5	350
	HFE-245cb2	CH ₃ OCF ₂ CHF ₂	4.9	708
	HFE-245fa2	CHF ₂ OCH ₂ CF ₃	5.5	659
	HFE-254cb2	CH ₃ OCF ₂ CHF ₂	2.5	359
	HFE-347mcc3	CHF ₂ CF ₂ OCH ₂ CF ₃	5	575
	HFE-347pcf2	CH ₃ OCF ₂ CF ₂ CF ₃	-	580
	HFE-356pcc3	CH ₃ OCF ₂ CF ₂ CHF ₂	3.8	110
	HFE-449ssl	C ₄ F ₉ OCH ₃	-	297
	HFE-569sf2	C ₄ F ₉ OC ₂ H ₅	-	59
	HFE-43-10pccc124	CHF ₂ OCF ₂ OC ₂ F ₄ OCHF ₂	13.5	1,870
	HFE-236ca12	CHF ₂ OCF ₂ OCHF ₂	20.8	2,800
	HFE-338pcc13	CHF ₂ OCF ₂ CF ₂ OCHF ₂	12.9	1,500
パーフルオロポリエーテル	PFPMIE	CF ₃ OCF(CF ₃)CF ₂ OCF ₂ OCF ₃	-	10,300
ハイドロカーボン等	ジメチルエーテル	CH ₃ OCH ₃	-	1
	メチレンクロライド	CH ₂ Cl ₂	0.4	8.7
	メチルクロライド	CH ₃ Cl	1	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とモリーナ博士が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	モンテリオール議定書第9回締約国会合開催（モンテリオール） 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	モンテリオール議定書第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テリオール議定書第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	モンテリオール議定書第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	モンテリオール議定書第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、改正モンテリオール議定書（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テリオール議定書第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	モンテリオール議定書第15回締約国会合開催（ナイロビ）
2004年	3月	モンテリオール議定書第1回特別締約国会合開催（モンテリオール）
	11月	モンテリオール議定書第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	モンテリオール議定書第2回特別締約国会合（モンテリオール）
	12月	ウィーン条約第7回締約国会議及びモンテリオール議定書第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）
2010年	11月	モントリオール議定書第22回締約国会合開催（バンコク）

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。2011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。2011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。

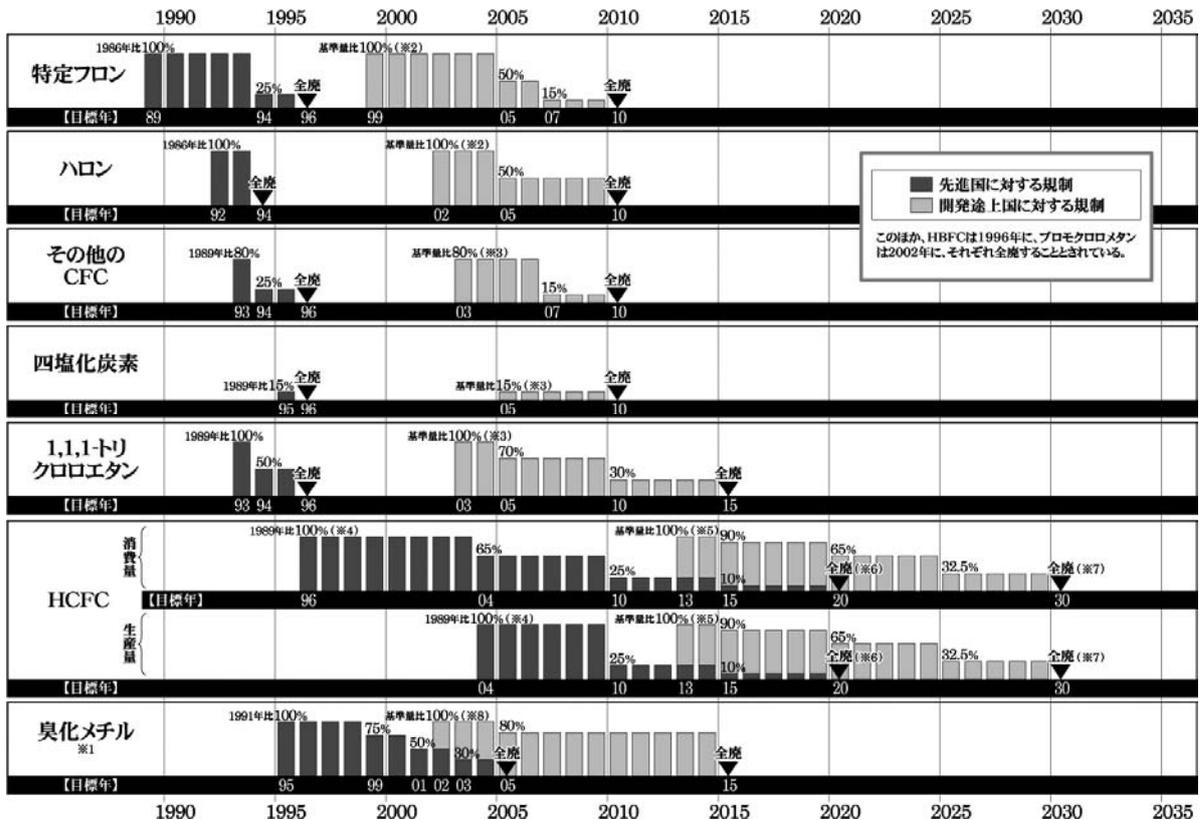


図 4-1 モントリオール議定書に基づく段階的削減スケジュール

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

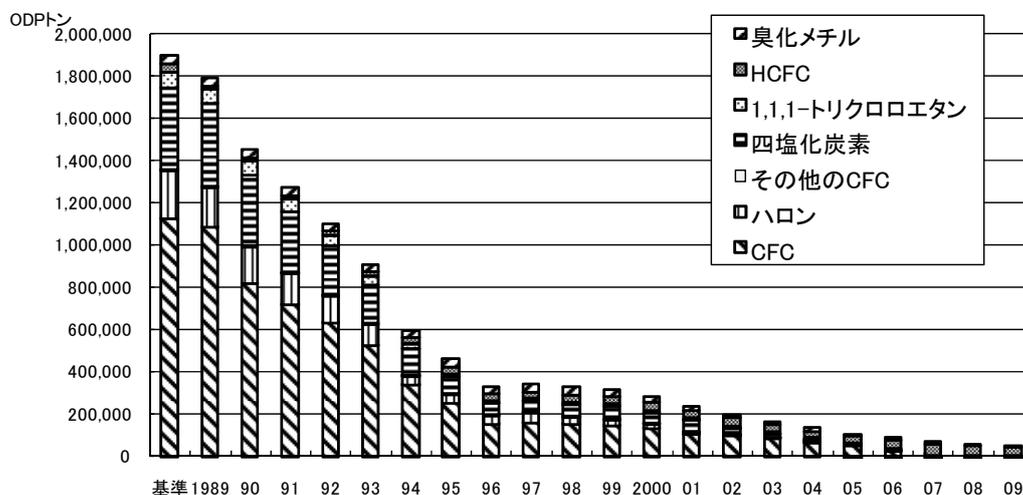


図 4-2 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の生産量の推移 (1989~2009年)
 ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完 (HCFC を除く) し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完 (先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完)。単位は ODP トン。
 (出典) UNEP オゾン事務局ウェブサイト

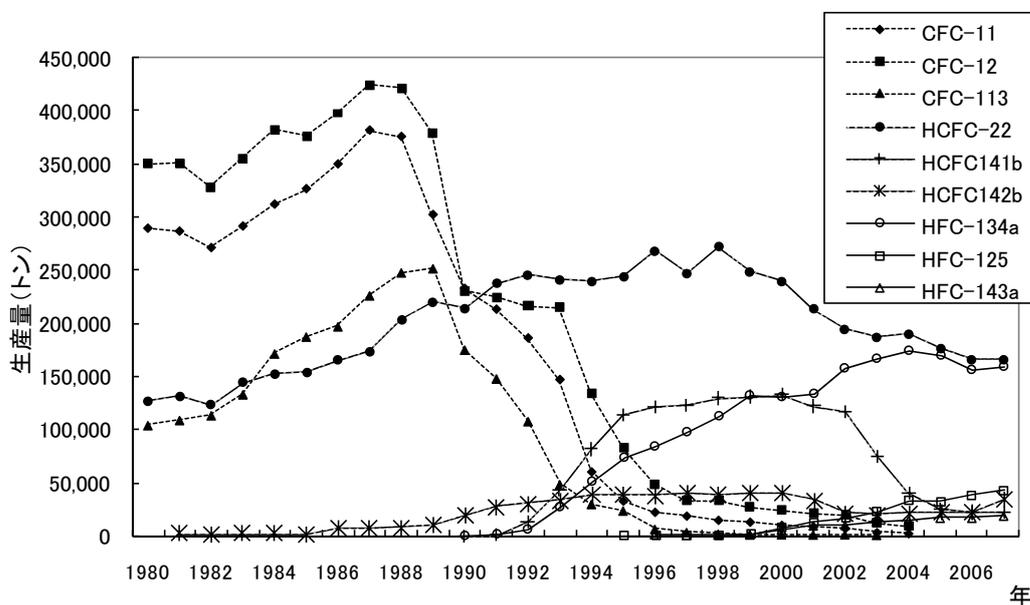


図 4-3 主要なフロン annual 生産量の推移 (1980~2007年)
 集計は AFEAS に登録のあったデータのみ。単位は重量トン。
 (出典) The Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS) ウェブサイト

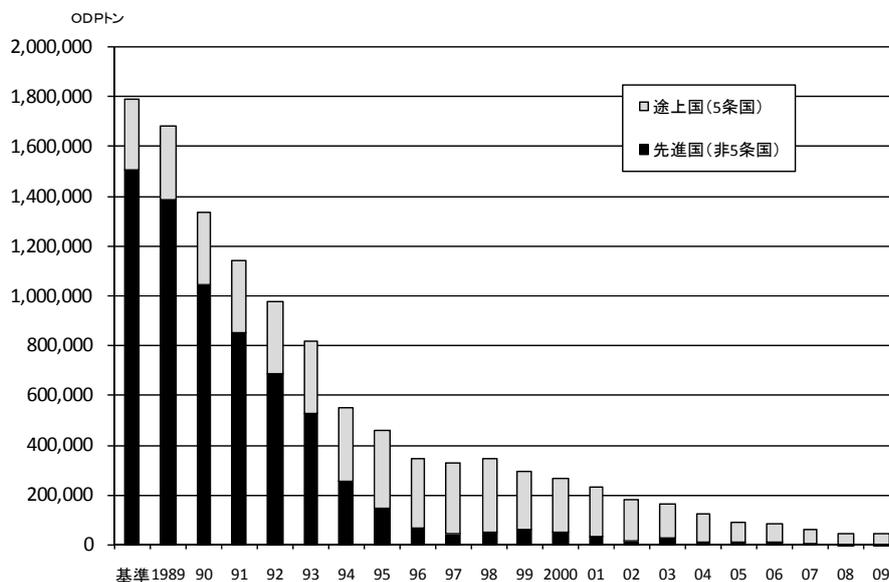


図 4-4 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の消費量の推移 (1989~2009年)
 ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完 (HCFC を除く) し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完 (先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完)。単位は ODP トン。
 (出典) UNEP オゾン事務局ウェブサイト

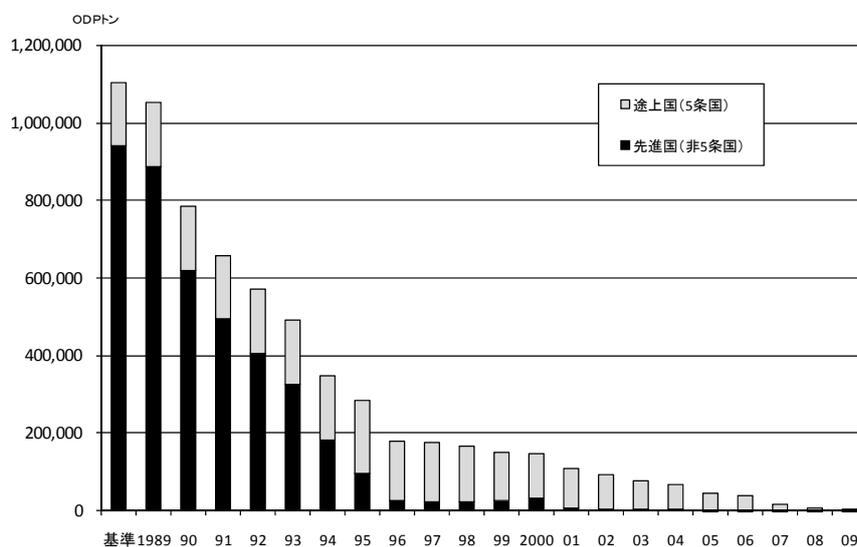


図 4-5 モントリオール議定書に基づく CFC (附属書 A グループ I) の消費量の推移 (1989~2009年)

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

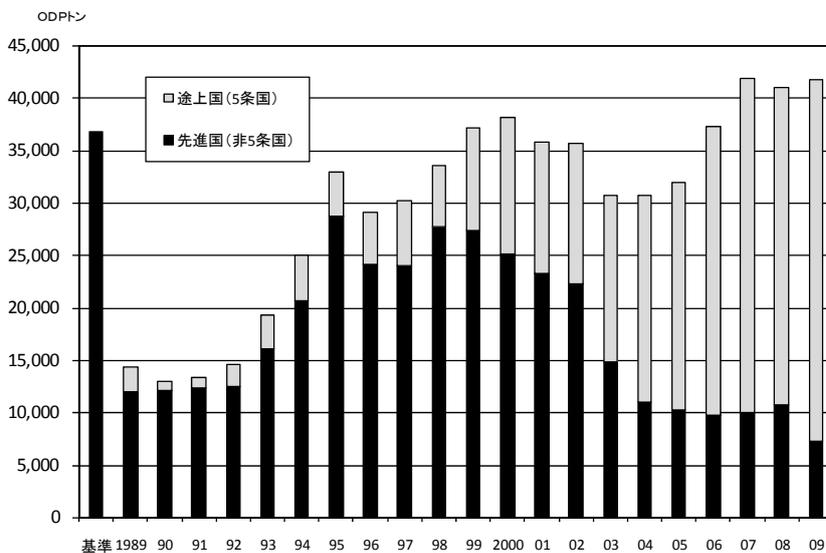


図 4-6 モントリオール議定書に基づく HCFC の消費量の推移 (1989~2009 年)
 ただし、先進国における 1990 年・1991 年のデータは一定の割合で変化するものとして補完。単位は ODP トン。
 (出典) UNEP オゾン事務局ウェブサイト

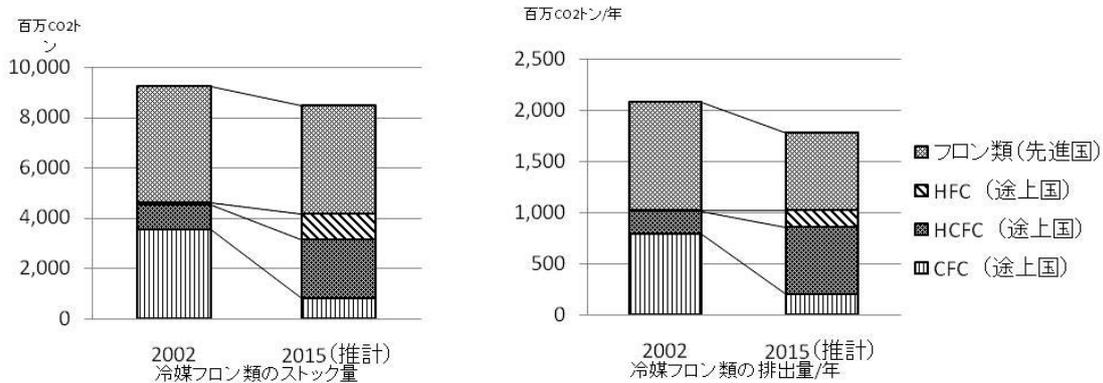


図 4-7 冷媒フロン類のストック量及び排出量/年 (2002 年・2015 年 (推計))
 単位は CO2 換算トン。
 (出典) IPCC/TEAP 特別報告

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用に限る。

・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
2009年	0	0	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。

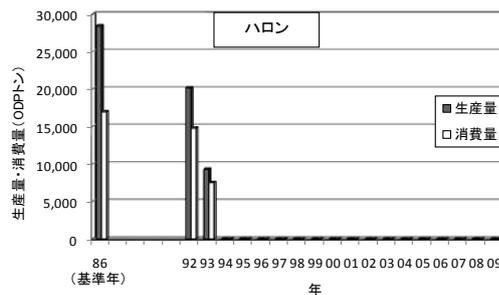
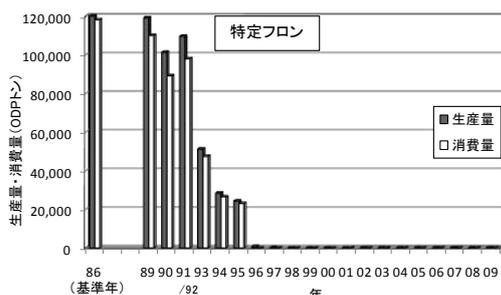


図 4-8 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 A）

（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
2009年	0	0	0	0	194	0

(1) 各年は1月から12月までの値となっている。

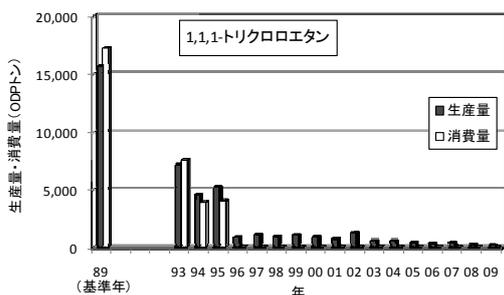
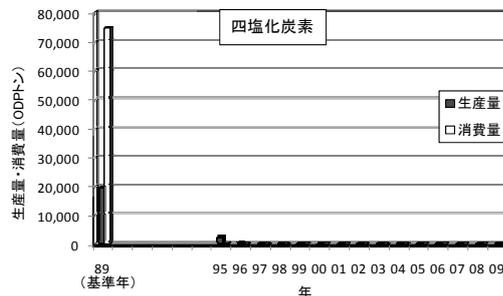
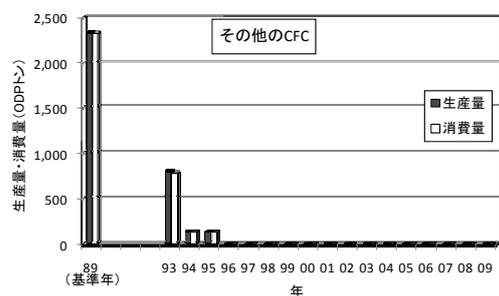


図 4-9 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 B）

（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
2009年	494	518	0	0	0	0	161	167

- (1) 各年は1月から12月までの値となっている。
- (2) HCFC の生産量の基準値=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 消費量の基準値=HCFC の1989年消費量算定値+CFC の1989年消費量算定値×0.028
- (4) 臭化メチルの生産量等の算定値には、締約国が検疫及び出荷前の処理のために使用する量を含まない。

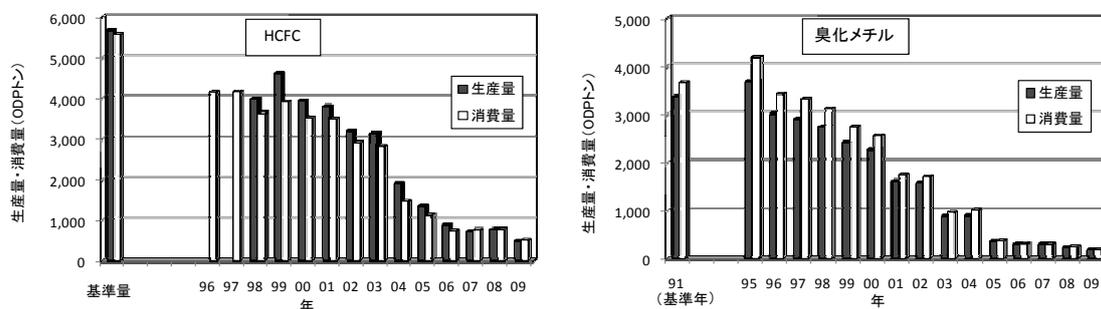


図 4-10 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 C、E）

（出典）経済産業省発表資料をもとに作成

(2) 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 4-4 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	平成21年度
業務用冷凍空調機器	866	952	905	878	1,033	1,237	1,172
家庭用エアコン	1,579	1,809	1,990	1,835	1,890	1,968	2,154
家庭用冷蔵冷凍庫	2,653	2,807	2,807	2,709	2,725	2,746	3,007
カーエアコン	1,697	1,830	2,469	2,628	2,663	2,755	3,060
合 計	6,795	7,398	8,171	8,050	8,311	8,706	9,393

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 4-5 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	平成21年度
業務用冷凍空調機器	CFC	338	298	292	348	342	290	207
	HCFC	1,458	1,665	1,823	1,987	2,404	2,814	2,661
	HFC	94	140	183	206	422	669	733
	計	1,889	2,102	2,298	2,541	3,168	3,773	3,601
家庭用エアコン	HCFC	858	989	1,112	1,024	1,048	1,098	1,182
	HFC	2	5	10	19	40	67	122
	計	860	994	1,122	1,043	1,088	1,166	1,304
家庭用冷蔵冷凍庫	CFC	262	269	249	218	196	177	167
	HCFC	5	7	10	11	12	12	15
	HFC	20	35	52	68	91	111	139
	計	287	311	311	298	299	299	320
カーエアコン	CFC	415	381	354	258	192	141	109
	HFC	223	321	457	546	617	731	865
	計	638	701	811	803	809	873	974
モントリオール議定書規制物質	CFC	1,015	947	894	824	730	608	483
	HCFC	2,320	2,662	2,945	3,022	3,464	3,924	3,858
	小計	3,335	3,609	3,839	3,845	4,194	4,532	4,341
京都議定書規制物質	HFC	339	500	701	840	1,170	1,578	1,859
合計		3,674	4,109	4,541	4,685	5,364	6,110	6,200

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。

$$\text{「自動車製造業者等による取引量」} + \text{「フロン類回収業者による再利用量」} + \text{「フロン類回収業者による当年度末保管量」} - \text{「フロン類回収業者による前年度末保管量」}$$

表 4-6 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	平成21年度
業務用冷凍空調機器 カーエアコン	CFC	627	954	557	590	479	376	271
	HCFC	1,467	1,604	1,625	1,821	2,095	2,439	2,164
	HFC	335	418	609	772	1,036	1,346	1,505
	計	2,429	2,976	2,790	3,183	3,611	4,161	3,941
家庭用エアコン	HCFC	849	966	1,107	1,028	1,043	1,103	1,173
	HFC	2	5	10	18	40	66	119
	計	851	971	11,117	1,046	1,083	1,169	1,293
家庭用冷蔵冷凍庫	CFC	257	267	249	219	197	179	165
	HCFC	4	7	10	12	12	12	14
	HFC	19	34	51	67	90	111	136
	計	280	309	310	298	299	301	315
モンテリオール議定書 規制物質	CFC	884	1,221	806	809	676	555	436
	HCFC	2,320	2,577	2,742	2,861	3,150	3,554	3,351
	小計	3,204	3,798	3,548	3,670	3,826	4,109	3,787
京都議定書規制物質	HFC	356	457	670	857	1,166	1,523	1,760
合計		3,560	4,255	4,218	4,527	4,992	5,632	5,547

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 4-7 ハロンの設置状況 (平成 22 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	30,154	15,215,244
	消火装置	9,484	683,148
	消火器	6,745	132,454
	小計	46,383	16,030,846
ハロン-2402	消火設備	352	176,776
	消火装置	64	9,436
	消火器	100	2,550
	小計	516	188,762
ハロン-1211	消火設備	36	15,708
	消火装置	7	500
	消火器	493	24,982
	小計	536	41,190
合計		47,435	16,260,798

(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 22 年度)

表 4-8 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
2009	89	99

(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 22 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 4-9 平成 21 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	(参考)排出量 (ODP トン)	(参考)排出量 (万CO2 トン)	届出	
		大気	公共用水域	排出量*2	合計			移動量*3	
CFC	CFC-11	217	9,606	0	513,783	523,389	523.4	248.6	44,200
	CFC-12	121	3,115	0	591,588	594,703	594.7	648.2	13,979
	CFC-113	213	19,566	0	0	19,566	15.7	12.0	0
	CFC-114	123	44	0	0	44	0.0	0.0	0
	CFC-115	94	0	0	91,845	91,845	55.1	67.7	0
	CFC-13	88	0	0	-	0	0.0	0.0	0
	CFC-112	201	-	-	-	0	-	-	0
	合計		32,331	0	1,197,216	1,229,547	1188.9	976.6	58,179
ハロン	ハロン1211	285	-	-	0	0	-	-	-
	ハロン1301	286	13,212	0	8,902	22,114	221.1	15.8	0
	ハロン2402	162	0	0	420	420	2.5	0.1	2,400
	合計		13,212	0	9,322	22,534	223.7	15.9	2,400
HCFC	HCFC-21	133	2,400	0	-	2,400	0.1	-	0
	HCFC-22	85	301,092	0	12,865,166	13,166,258	724.1	2383.1	152,215
	HCFC-123	124	54,380	0	186,716	241,096	4.8	1.9	3,130
	HCFC-124	86	42	0	-	42	0.0	0.0	0
	HCFC-133	87	16,000	0	-	16,000	1.0	-	4,100
	HCFC-141b	132	579,898	0	4,098,090	4,677,988	514.6	339.2	71,532
	HCFC-142b	84	3,898	0	586,305	590,203	38.4	136.3	8,600
	HCFC-225	144	348,462	0	546,433	894,895	62.6	32.1	40,716
	合計		1,306,172	0	18,282,710	19,588,882	1345.6	2892.5	280,293
四塩化炭素	112	6,305	211	-	6,516	7.2	0.9	170,220	
1,1,1-トリクロロエタン	209	2,579	10,605	0	13,184	1.3	0.2	16	
臭化メチル	288	221,983	330	855,224	1,077,537	646.5	0.5	4,800	
合計		1,582,582	11,146	20,344,472	21,938,200	3,413	3,887	515,908	

*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

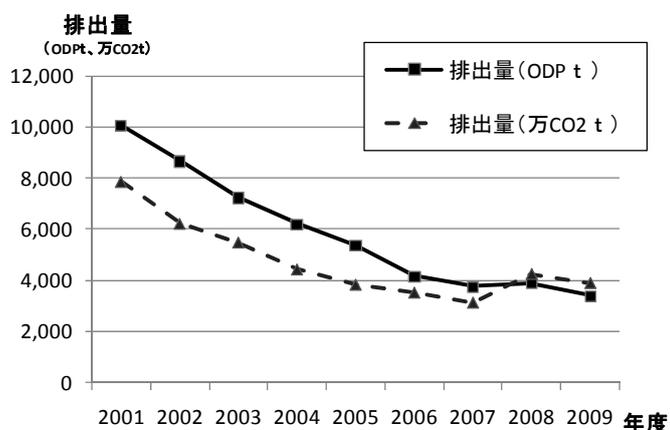


図 4-11 PRTR に基づくオゾン層破壊物質の排出量 (ODP 換算、CO₂換算)

(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 4-10 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

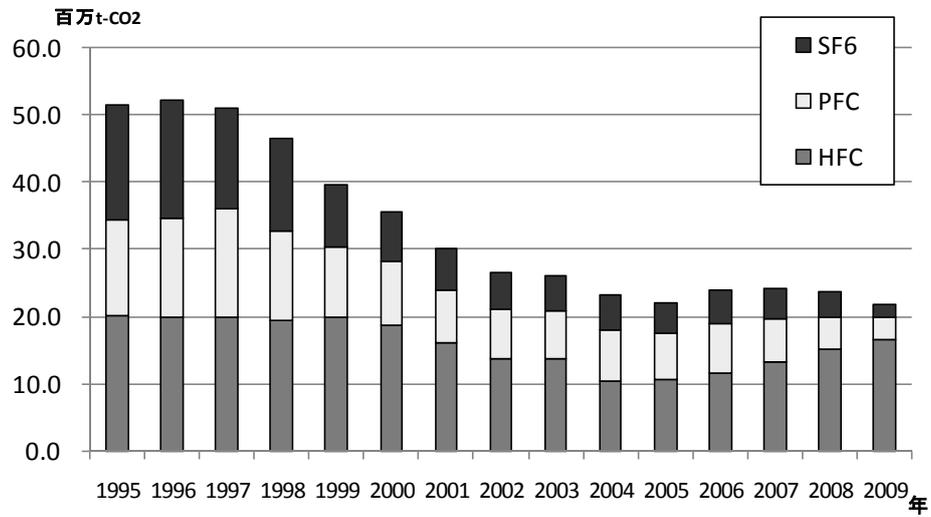


図 4-12 代替フロン等 3 ガスの排出量の推移 (ガス別)

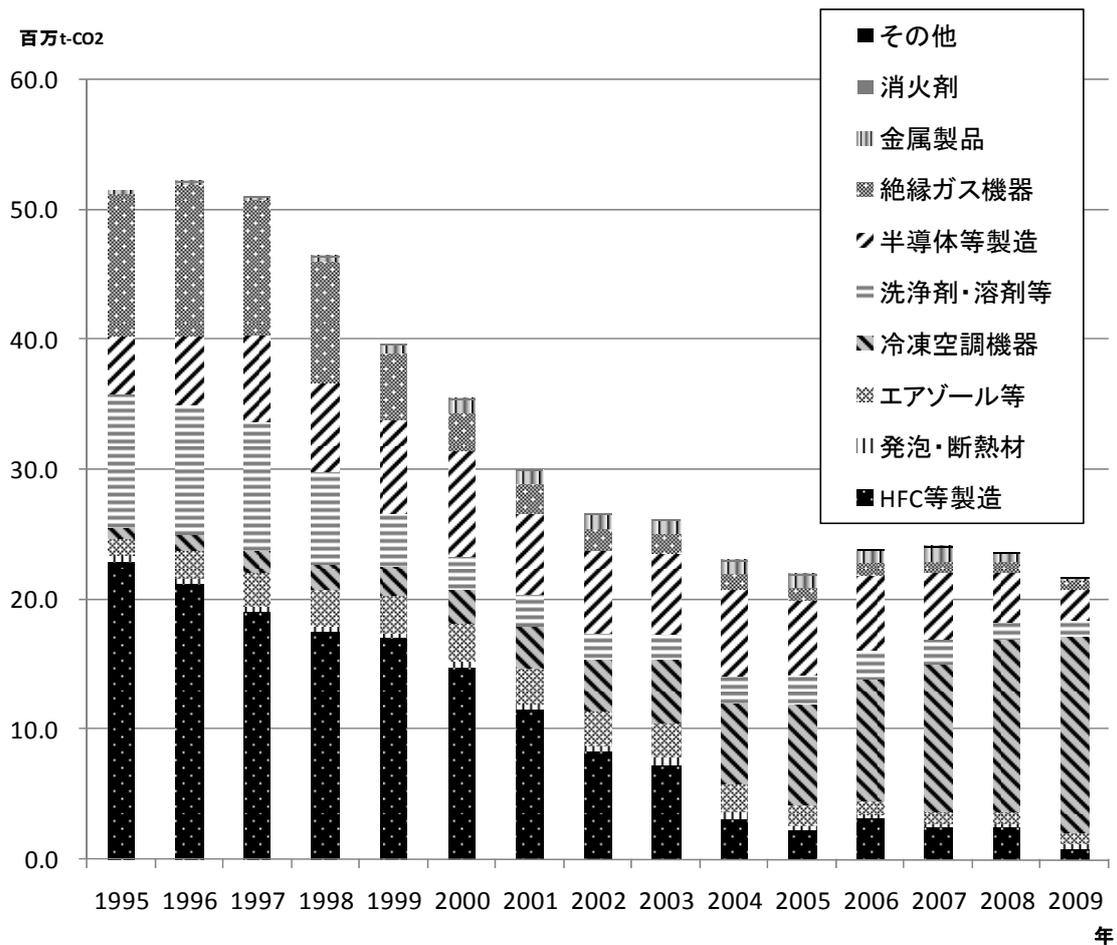


図 4-13 代替フロン等 3 ガスの排出量の推移 (排出源別)

(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 4-11 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 23 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。

表 4-11 グリーン購入法（国等による環境物品等の調達に関する法律）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 23 年 7 月現在）（続き）

飲用自動販売機 設置	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●冷媒に次の物質が使用されていないこと。 <ul style="list-style-type: none"> ア. オゾン層を破壊する物質 イ. ハイドロフルオロカーボン（いわゆる代替フロン） ただし、上記イについては、次のいずれかに該当する場合は、適用しないものとする。 <ul style="list-style-type: none"> a. 紙容器飲料自動販売機又はカップ式飲料自動販売機 b. 使用される冷媒に用いられている物質の地球温暖化係数が相当程度小さい場合（地球温暖化係数 140 未満） ※）ここで、「地球温暖化係数」とは、温室効果ガスである物質ごとに地球の温暖化をもたらす程度を二酸化炭素に係る当該程度に対する比で示した数値をいう。 なお、上記イについては、平成 23 年度の 1 年間は経過措置を設けることとし、この期間においては、当該基準を満たさない場合であっても、特定調達物品等とみなすこととする。なお、経過措置については、市場動向を勘案しつつ、適切に検討を実施することとする。 ●断熱材発泡剤に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。
---------------	---

※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に力を入れている。

表 4-12 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 4-13 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。
モンゴル	HCFC削減管理計画(XPS製造工場におけるHCFC消費量削減事業)	2011年	130,000ドル (多数国間基金)	モンゴルにおけるHCFC削減管理計画のうちモンゴル国内の2つのXPS製造工場におけるHCFC転換。

1-5. オゾン層保護対策の効果

(1) モントリオール議定書によるオゾン層保護の効果

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、オゾン層破壊物質（ODS）の生産・消費に関する具体的な規制措置を進め、EESC（P12 参照）を減少させる効果を上げてきた。モントリオール議定書は 1987 年の採択以来、6 回にわたって改正・調整されてきたが、それぞれの改正・調整が EESC の減少にどのような効果をもたらしたかを予測したものが図 4-14 である。1992 年のコペンハーゲン改正以降、EESC の長期的な減少が予測されている。

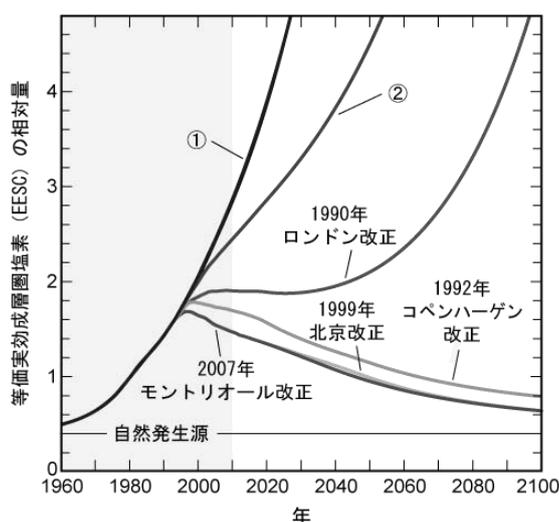


図 4-14 モントリオール議定書の EESC の削減効果

オゾン層破壊物質の量に関する将来予測を EESC で示したものの。モントリオール議定書が採択されていないと仮定した場合 (①)、モントリオール議定書採択当時 (1987 年) の規制に即した場合 (②) 及びその後の改正・調整による場合別に EESC の予測量が表されている。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion:2010 (WMO, 2011)より作成

モントリオール議定書による取組みにより EESC が減少したことは、深刻なオゾン層破壊が回避できたことを意味している。図 4-15 は化学気候モデルを用いて規制の有無による年平均のオゾン全量の緯度分布の違いを示したものである。ODS に対する規制が実施されたもとでの 2000 年のオゾン全量と ODS に対する規制が取られなかった状況下でのオゾン全量の変化を比較すると、2000 年時点では規制無しのシナリオでのオゾン全量の緯度分布は規制有りのシナリオでの緯度分布に比べて、極域や低緯度域でのオゾン全量が少ないが、全体的には大きな違いは現れていない。これは、図 4-14 からわかる通り、2000 年の時点では規制の有無による EESC の値の差はさほど顕著でないことと矛盾しない。一方、ODS に対する規制無しのシナリオ下でのオゾン全量の 2020 年以降の変化については、2020 年には南極域のオゾン全量は年平均でもオゾンホール基準である 220m atm-cm を下回り、2040 年には、北極域ならびに低緯度域でも年平均のオゾン全量が 220m atm-cm 程度になることが予測されている。更に 2052 年の段階では、年平均のオゾン全量は全て

の緯度帯において、オゾンホール基準である 220m atm-cm を下回る予測となっており、深刻な影響が見込まれることが分かる。

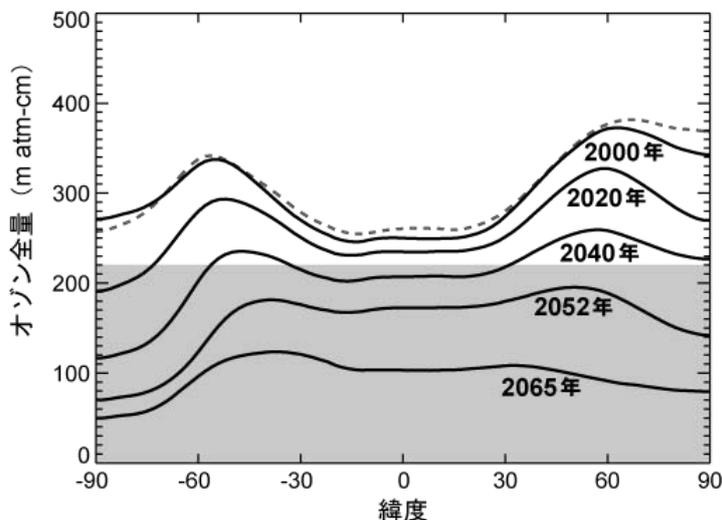


図 4-15 モントリオール議定書によるオゾン層の保護効果

モントリオール議定書によるオゾン層破壊物質の規制がないと仮定した場合のオゾン全量の予測を緯度帯別に平均したもの。波線は、ODS に対する規制を考慮したシナリオのもとで計算されたオゾン全量の緯度分布。網掛けは 220m atm-cm 以下の部分。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion:2010 (WMO, 2011)より作成

ODS に対する規制が取られなかった状況を仮定して計算されたオゾン全量の減少は、地上付近での太陽紫外線の増加にも大きな影響を与える。図 4-15 のシミュレーションに基づき、北半球中緯度の正午の UV インデックスを予測したものが図 4-16 である。これによれば、オゾン層破壊物質の規制が行われていなかったと仮定すると、2065 年までには北半球中緯度帯の夏季の UV インデックスは現在の 3 倍に達すると予測されている。

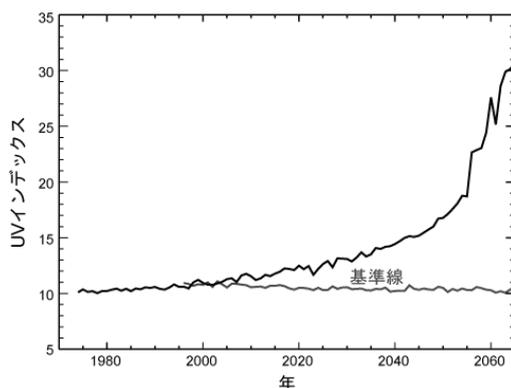


図 4-16 北半球中緯度帯の UV インデックスの予測 (仮定)

モントリオール議定書によるオゾン層破壊物質の規制がないと仮定した場合の UV インデックスの予測。北半球中緯度帯 (北緯 30~50 度) における夏季 (7 月 2 日) の正午を想定している。基準線はオゾン層破壊物質の現行の削減シナリオに基づいた予測。UV インデックスの強度については、8~10 は「非常に強い」、11 以上は「極端に強い」強度とされている。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion:2010 (WMO, 2011)より作成

(2) モントリオール議定書による地球温暖化防止への貢献

オゾン層破壊物質である CFC は、オゾン層の破壊に関係しているだけでなく、二酸化炭素やメタン等と同様に、温室効果ガスという性質を持つ。モントリオール議定書によるオゾン層破壊物質の規制は、オゾン層保護だけではなく地球温暖化の防止にも貢献してきた。図 4-17 は地球温暖化係数で重み付けした放出量を示している。図中の網掛け部分は、モントリオール議定書により避けられた放出量を示した部分である。2010 年現在、モントリオール議定書によって削減されたオゾン層破壊物質の放出量は、二酸化炭素の量に換算すると、1 年あたり約 100 億トンに相当する割合で減少したことになる。これは、先進国の温室効果ガス排出量削減目標を定めた京都議定書の第一約束期間（2008～2012 年）の削減目標（二酸化炭素換算で 1 年あたり約 20 億トン）の 5～6 倍に相当する。

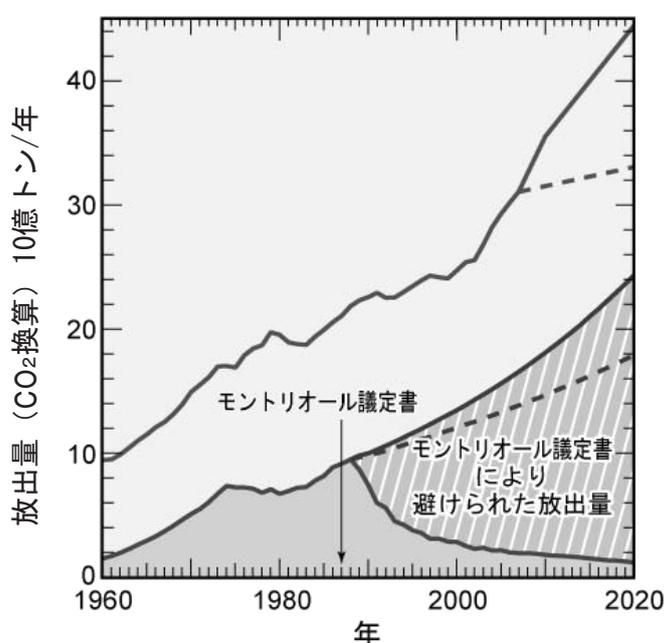


図 4-17 地球温暖化係数で重み付けした放出量（CO₂換算）

実線 a はオゾン層破壊物質を地球温暖化係数で重み付けして合計した世界の放出量であり、モントリオール議定書の効果により減少に転じていることが分かる。実線 b・破線 c は議定書による規制がなく、1987 年から毎年 3% 増加したと仮定した場合（実線 b）と毎年 2% 増加したと仮定した場合（破線 c）の放出量である。実線 d は二酸化炭素の放出量であり、2007 年までは世界の化石燃料使用量とセメント生産量から求められたものである。2007 年以降は、IPCC の排出シナリオに関する特別報告書（SRES）による二酸化炭素放出シナリオの最大（A1B）を表す。破線 e は SRES シナリオのうち、最小（B2）の二酸化炭素放出量を表す。

（出典）Scientific Assessment of Ozone Depletion:2010 (WMO, 2011)より作成

(3) HFC による地球温暖化への影響

モントリオール議定書による CFC や HCFC 等の生産規制をうけ、オゾン層を全く破壊しない HFC が利用されている。しかし、HFC は強力な温室効果ガスであることが分かっており、京都議定書において削減対象となっている。図 4-18 は HFC の温暖化効果を示したものであり、二酸化炭素に比べて温暖化係数が高いことが分かる。

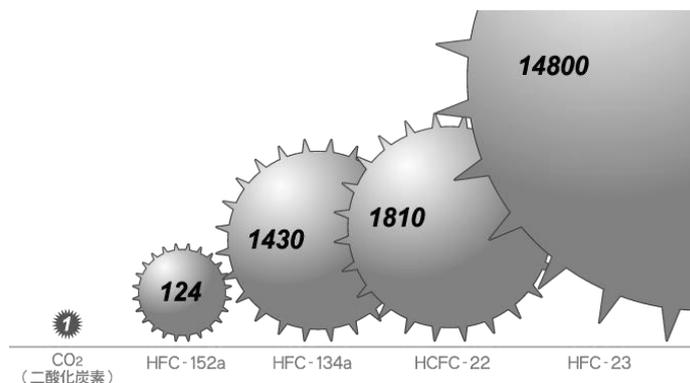


図 4-18 HFC の地球温暖化係数

二酸化炭素を 1 とした場合の HFC の地球温暖化係数を示したものである。数値の出典は IPCC 第 4 次評価報告書 (2007) による。

二酸化炭素に換算した HFC の放出量は年あたり 8% の割合で増加しており、今後さらに加速すると予測されている (図 4-19)。HFC の規制が行われないと仮定したシナリオによれば、地球温暖化係数を考慮した放出量は、2050 年までに 1988 年のピーク時の CFC に匹敵するようになり、温室効果に対する HFC の寄与が高まることが予測され、気候変化を通じたオゾン層への影響が考えられる。

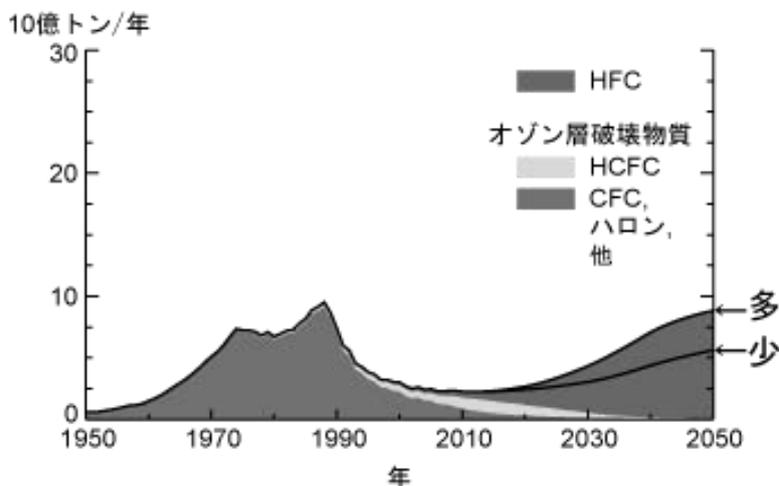


図 4-19 地球温暖化係数で重み付けした HFC の放出量予測

地球温暖化係数で重み付けした HFC、HCFC 及び CFC の放出量を示す。各物質の放出量にそれぞれの地球温暖化係数 (直接効果のみ、評価期間 100 年で、二酸化炭素を 1 とする) を乗じて、二酸化炭素相当の放出量を求めた。HFC の「多」「少」の表示は、それぞれ予測シナリオの中の上限・下限を示す。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion:2010 (WMO, 2011)より作成

2. WMO科学評価パネル報告書要旨(2010年)*

オゾン層破壊の科学アセスメント：2010 Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010

総括要旨 Executive Summary

1. 概観

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

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

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

ほとんどのオゾン層破壊物質は強力な温室効果ガスである。過去数十年間に濃度が増加したことが、地球温暖化の一因となってきた。モントリオール議定書の下で取られた対策

* 気象庁「オゾン層観測報告:2010」より引用、一部改変

によって、オゾン層破壊物質が増えていたら起こったであろう顕著な地球温暖化が抑制された。

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

2. 成層圏オゾンと気候に影響を及ぼす物質の変化

ある物質が大気全体に含まれる量の変化は、大気中への放出量と大気中からの除去量との収支バランスで決まる。モントリオール議定書の下で規制されているオゾン層破壊物質の濃度が減少したことは、放出量が世界的に削減されて除去量を下回った結果である。ほとんどのオゾン層破壊物質は強力な温室効果ガスである。主要なオゾン層破壊物質の段階的廃止に伴い、代替物質である HCFC 類と HFC 類の需要が増えたが、これらもまた温室効果ガスである。HCFC 類は単位重量あたりのオゾン層破壊能力が CFC 類よりも小さく、HFC 類は非オゾン層破壊物質である。

(1) オゾン層破壊物質と代替物質：対流圏の濃度と放出量

- ・ モントリオール議定書とその改正・調整の成果により、ほとんどの規制対象オゾン層破壊物質の放出量（図 4-20）と下層大気（対流圏）での存在量のほか、それらを起源とする全塩素量と全臭素量も減少し続けている。オゾン層破壊物質と塩化メチルから放出された対流圏中の全塩素量は、ピーク時の 3.7ppb から 2008 年までに 3.4ppb に減少したが、減少率は想定のおよそ 3分の2程度でしかなかった。これは、CFC 類の減少が想定より遅いのに加え、HCFC 類の濃度が想定より早く増加しているためである。CFC 類の減少が遅れたのは、冷蔵庫・エアコン・発泡材のような現在使用中の「貯蔵物」から放出されたためと思われる。HCFC 類の急速な増加は、特に東アジアの発展著しい諸国における生産量の増加と同時に起きている。規制対象オゾン層破壊物質を起源とする対流圏中の全臭素量の減少率は想定と近いが、これは臭化メチルの減少によってもたらされたものである。
- ・ 過去数年間に全塩素量が減少した最大の原因は CFC 類の減少であり、これは 21 世紀中続く見込みである。観測によると CFC-12 の対流圏中の濃度は、初めて減少に転じた。メチルクロロホルム (CH_3CCl_3) 濃度の減少による全塩素量の減少は、過去のアセスメントより小さく評価した。その寿命が短いため既に大半が大気中から除去されているためである。

- ・ **四塩化炭素 (CCl₄) の濃度減少は、想定よりも遅かった。** UNEP に報告されたデータから見積もった CCl₄ の放出量は変動が非常に大きく、平均的には観測された濃度変化傾向から推定した放出量よりも小さかった。この違いは、CCl₄ の大気中の残留時間（寿命）に関する知見が不確実なことから生じているが、寿命の不確実性では CCl₄ の放出量の変動を説明することはできない。年ごとに放出量の推定値の差が異なる原因として、報告値そのものの誤差やデータ解析時に生じた誤差、知られていない放出源などが考えられる。
- ・ **熱帯の対流圏界面付近で行った観測によると、塩化メチレン (CH₂Cl₂)、クロロホルム (CHCl₃)、1,2 ジクロロエタン (CH₂ClCH₂Cl)、パークロロエチレン (C₂Cl₄) など、モントリオール議定書で現在規制されていない幾つかの非常に短い寿命の工業的塩化物物質が、成層圏に到達していることがわかった。** しかしながら、これが成層圏塩素量の増加をどの程度もたらすかは、よくわかっていない。
- ・ **ハロン類を起源とする臭素の量は、2005～2008 年の間に対流圏では増加しなくなった。** 予測されていたとおり、ハロン-1211 の濃度は 2005～2008 年の間に初めて減少に転じた。一方、ハロン-1301 は前回のアセスメントで予測したよりも緩やかに増加し続けている。
- ・ **対流圏の臭化メチルの濃度は、工業生産量、消費量、放出量ともに削減されたことにより、2005～2008 年の間予想どおり減り続けた。** いまなお続いている臭化メチル消費の約半分は、モントリオール議定書で規制されない用途（検疫と出荷前処理）のためのものである。
- ・ **HCFC 類の中には、対流圏の濃度および放出量が 4 年前よりも速く増加しているものがある。** そのうち最も濃度の高い HCFC-22 の量は、2007～2008 年には 2003～2004 年より 50%速く増加した。また、HCFC-142b の濃度は、2003～2004 年の約 2 倍の速さで増加した。HCFC-141b の濃度は、2003～2004 年と同様の増加率で増えた。HCFC 類の放出量は、モントリオール議定書の下で既に合意されている規制の効果によって、今後 10 年程度で減少し始めると予測される（図 4-20）。
- ・ **HFC 類は、主に CFC 類と HCFC 類の代替物質として使われており、対流圏の濃度と放出量ともに増加し続けている。** 例えば、HFC 類の中で最も多く存在する HFC-134a の濃度は、最近毎年約 10%ずつ増加している。HFC-125、HFC-143a、HFC-32、HFC-152a など他の HFC 類の濃度も増加している。地域別に推計した研究によれば、ヨーロッパ、アジア、北米から多量に放出されているようである。

(2) CFC 類、HCFC 類、HFC 類と気候変化

- ・ モントリオール議定書とその改正・調整は、温室効果ガスの放出量を減少させる意味でも大いに貢献してきた（図 4-20）。2010 年現在、モントリオール議定書の下でのオゾン層破壊物質の放出削減量は、1 年あたり約 100 億トンの二酸化炭素の放出抑制に相当すると推定されている*。これは、京都議定書の第一約束期間（2008～2012 年）における年間温室効果ガス削減量目標値の約 5 倍である。
- ・ オゾン層破壊物質の代替物質として現在使われている HFC 類の放出量は、二酸化炭素換算で年あたり合計約 4 億トンであり、HCFC 類は約 7 億トンである。また、二酸化炭素に換算した HFC 類の放出量は年あたり 8%の割合で増加しており、今後さらに加速すると予測されている。一方、HCFC 類については今後 10 年で減少し始めると予測されている。
- ・ HCFC-22 の副産物である HFC-23 の放出量は、2006～2008 年の間に二酸化炭素換算で年あたり約 2 億トンであった。HFC-23 は、約 220 年の寿命をもつ特に強力な温室効果ガスである。京都議定書のクリーン開発メカニズムによるものを含め世界的に削減対策が進められているにもかかわらず、過去 10 年で放出量が増加している。

(3) 全塩素量および全臭素量、ならびにオゾン層破壊への影響

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

* ここでいう二酸化炭素換算の放出量は、対象とする物質の放出量に 100 年間の地球温暖化係数を乗じたものと定義する。

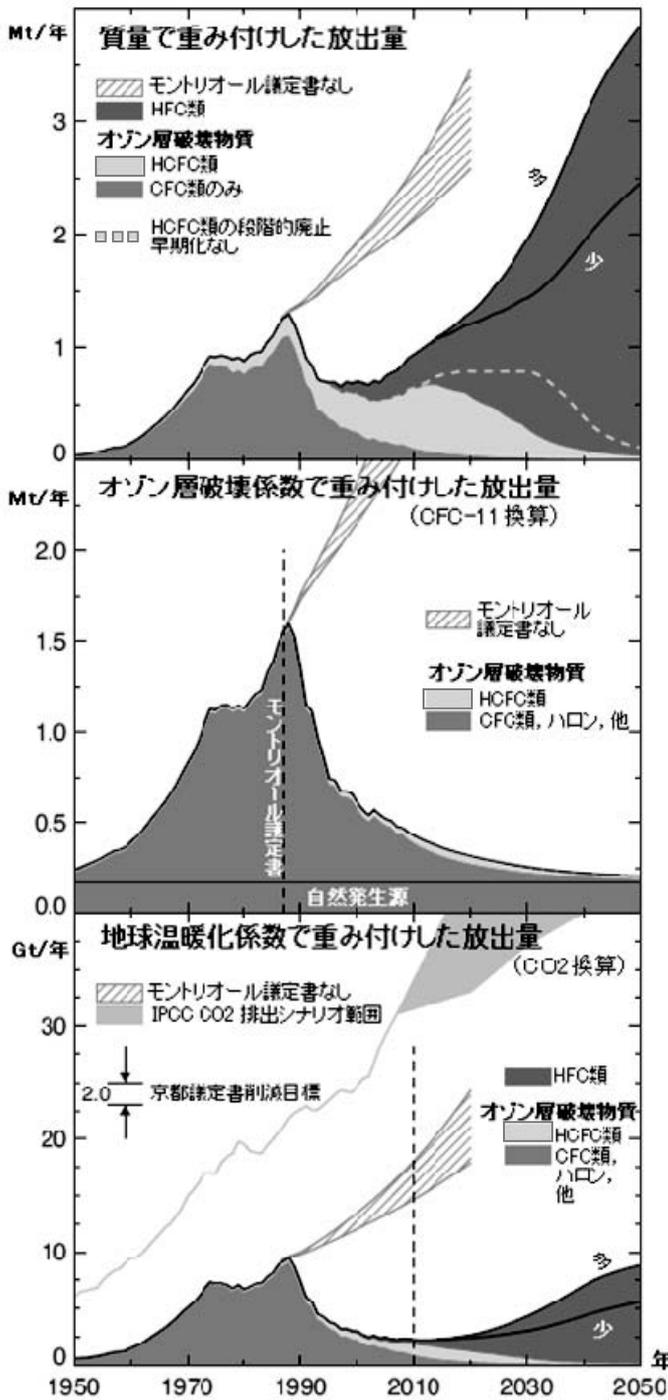


図 4-20 オゾン層破壊物質と代替物質の放出量

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

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

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

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

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

3. 南極域のオゾンと気候

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

- ・ 南極の春季にオゾン全量が減少する現象（オゾンホール）は、1980年頃に最初に認識できるようになり、その後毎年発生している（図 4-21 の c）。オゾンの減少量は主に気象の変動に起因して年々変動するが、極渦内の 10 月の平均オゾン全量は過去 15 年間の平均で 1980 年より約 40% 少なくなった。1991～2006 年に南極点で観測された紅斑紫外線（日焼けをもたらす紫外線）の平均値は、1963～1980 年の推定値に比べ 55～85% 多かった。
- ・ 前回のアセスメント以降に南極オゾンホールの原因についての理解に誤りがあるのではないかという疑問が提起されたが、現在までに解決されている。極域のオゾン層破壊で鍵となる化学反応に関して新しく室内実験測定が行われ、その結果、オゾン層破壊物質がオゾンホールの原因に間違いないことが再確認された。オゾンホールに関与する化学物質の量を野外観測から見積もった結果からも、その結論が支持されている。
- ・ 南極オゾンホールが南半球の地上の気候に影響を与えていることを示す証拠が増えている。気候モデルを用いたシミュレーションにより、オゾンホールが南半球の中高緯度帯で夏季に観測される地上風の変化を引き起こす主要因であることが示された。地上風の変化が、南極半島の温暖化と南極高原の寒冷化の一因になった。その変化はまた、降水の地域的变化、南極周辺の海水の増加、南極海の温暖化および二酸化炭素の海洋吸収の局地的な減少とも関連している。
- ・ 南半球の夏季の地上風の変化傾向は、今後数十年も続かないと予測される。温室効果ガスの増加とオゾンホールの回復によって、地上風に及ぼす影響が相殺されると予測されるためである。
- ・ 観測によると、南極の春季のオゾン全量は、まだ統計的に有意な増加傾向を示していない（図 4-21 の c）。現在のところ、極渦の中でオゾン層破壊物質がわずかに減少したことによる変化量よりも、気象に起因して生じる年々変動の方が大きい。これは、化学気候モデルを使ったシミュレーション結果とも一致している。

- ・ 南極の春季のオゾン全量は、21 世紀中はオゾン層破壊物質量の減少が主要因になって推移すると予測される（図 4-21 の c）。化学気候モデルを用いたシミュレーションによれば、温室効果ガスの変化がオゾンホールに及ぼす効果は、過去においてオゾン層破壊物質の効果よりも小さかったこと、そして将来もその状況は変わらないことが示されている。今世紀末においてさえも、小規模で一時的な南極オゾンホールが起こる可能性がある、という見解もある。南極域では、春と初夏に地上紫外線が非常に強くなるという状況が続くことになる。

4. 世界と北極域のオゾンと気候

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

- ・ 2006～2009 年の平均オゾン全量は、前回アセスメントと同じレベルで、1964～1980 年平均と比べて南緯 90～北緯 90 度の平均で約 3.5%、南緯 60～北緯 60 度の平均で約 2.5%少なかった。2006～2009 年の中緯度（35～60 度）の平均オゾン全量は、1996～2005 年と同じレベルであり、1964～1980 年の平均よりも南半球で約 6%、北半球で約 3.5%小さかった。
- ・ 2007～2010 年の間の北極域における冬季と春季のオゾン減少には年々変動がみられるが、1990 年代初め以降にみられた変動の範囲内に留まっている。北極で寒さが厳しい冬季には、以前と同様に化学過程によってオゾンが大きく減少している。
- ・ 北極域の成層圏オゾン層破壊と対流圏および地上の気候変化との関連は、まだ明瞭なものが、みられないが、オゾン層破壊量が南極域と比べて小さいことから予想されていたことである。
- ・ オゾン層破壊物質が増加していた頃に観測された両半球中緯度帯のオゾン変化傾向とその、緯度方向、鉛直方向の構造が、ともに化学気候モデルで再現された。これにより、オゾン変化に関するこれまでの基本的な理解は間違っていなかったことが確か

められた。モデルによるシミュレーションの結果は、最近 10 年間に世界のオゾン全量の変化が小さくなっているという観測事実と一致している。

- ・ 地上および衛星の観測データを用いた解析の結果、中緯度帯の紅斑紫外線量は 1970 年代後半以降増加していることが示された (図 4-21 の e)。ほかの要因 (主に雲とエアロゾル) が紅斑紫外線の長期変化に影響を与えることを考慮する必要はあるものの、この結果はオゾン全量観測値が減少していることと定性的に一致している。中緯度帯の大気汚染のない地点における晴天時の紫外線観測によれば、1990 年代後半以降の紫外線強度はほぼ一定であり、この期間のオゾン全量観測結果と整合している。
- ・ 衛星およびラジオゾンデの観測データを用いた新しい解析結果から、1980~2009 年の成層圏気温の変化に関して信頼性の高い結論が得られた。1980~1995 年の間の世界平均気温は、下部成層圏で 1~2°C、上部成層圏で 4~6°C それぞれ低下した。概ね 1995 年以降の世界平均の成層圏気温には、有意な長期変化傾向はみられない。下部成層圏の寒冷化は直線的ではなく、1980 年代初期と 1990 年代初期に段階的に温度が低下している。下部成層圏の寒冷化は、以前は中高緯度帯に限られると考えられていたが、熱帯でも起こっていることがわかった。
- ・ 下部成層圏の気温の時間変化には、自然要因と人為的要因の両者の変化が複合的に影響する。1980 年以降の下部成層圏の寒冷化は、オゾン減少の影響を受けている。大規模な火山噴火と太陽活動は、明瞭でより短期的な効果をもつ。これらの要因をすべて考慮したモデルにより、この気温の変化経過を再現することができる。
- ・ 成層圏のオゾン、水蒸気、エアロゾルの変化はすべて、放射過程を通じて地上気温に影響を与える。成層圏オゾン層破壊による 2008 年の気候放射強制力* ($-0.05 \pm 0.1 \text{ W/m}^2$) は、その破壊の大きな原因である CFC 類と HCFC 類がもつ正の放射強制力 (およそ $+0.3 \text{ W/m}^2$) よりも絶対値がかなり小さい。なお、二酸化炭素の現在の放射強制力は約 $+1.7 \text{ W/m}^2$ である。放射計算と気候モデルを用いた研究によれば、成層圏の水蒸気変化が放射に与える効果 (10 年あたり $\pm 0.1 \text{ W/m}^2$ 程度) は、世界平均した地上気温の 10 年スケールの変化に寄与し得るとみられている。気候モデルと観測事実から、大規模な火山噴火 (例えば 1991 年のピナトゥポ火山ではおよそ -3 W/m^2 の効果) の後、数年間にわたって地上の寒冷化が起こり得ることがわかっている。
- ・ 中部および上部成層圏では、主に二酸化炭素の増加によって今後 100 年程度は寒冷化が続くと予測される。成層圏オゾンの回復により、この寒冷化がわずかに緩和される。

* 一般に正の放射強制力は地表面を暖め、負の強制力は地表面を冷やす。

HFC 類の濃度が成層圏で 1 ppb レベルに達した場合、熱帯の下部成層圏と圏界面付近の気温が約 0.3°C 高くなる可能性がある。

- ・ 最近のモデルシミュレーションから新たにわかったことに、温室効果ガスの増加によりブリューワー・ドブソン循環として知られる成層圏循環が強まるという予測がある。このような循環強化が起こると、オゾン全量が熱帯で減少しそのほかの緯度帯で増加するといった非常に重要な結果をもたらす得る。しかし、循環強化を引き起こすメカニズムはまだ解明されておらず、循環が強まっているという観測事実もまだない。
- ・ 世界全体のオゾン量は、オゾン層破壊物質の減少にほぼ同調して回復すると予測されているが、上部成層圏の寒冷化によりさらに加速される。世界全体のオゾン量は、成層圏循環の変化には大きく影響されないため、この予測には高い信頼性がある。
- ・ 北極域のオゾン量の増加は、南極域に比べ、気候変化の影響を受けやすいと予測される。予測どおり成層圏のブリューワー・ドブソン循環が強化されれば、北極域の下部成層圏のオゾン量をかなり増加させるとみられ、上部成層圏の寒冷化による温室効果ガス起源のオゾン量増加を促進し、1980 年レベルへの回復を早めることが予測される。
- ・ 温室効果ガスが引き起こす気温と循環の変化により、中緯度のオゾン全量の 1980 年レベルへの回復が数十年早まり、今世紀末までには 1980 年レベルを十分に上回ると予測される。その効果は、北半球中緯度帯で最も顕著であり（図 4-21 の d）、晴天時の地上紫外線の強度は今世紀半ばまでには 1980 年レベルを十分に下回る可能性がある（図 4-21 の e）。南半球の中緯度帯では、循環変化の効果が比較的弱いことが予想されるうえに、オゾン量が 1980 年レベルに回復するのがもっと遅い南極の影響も受ける。

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

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

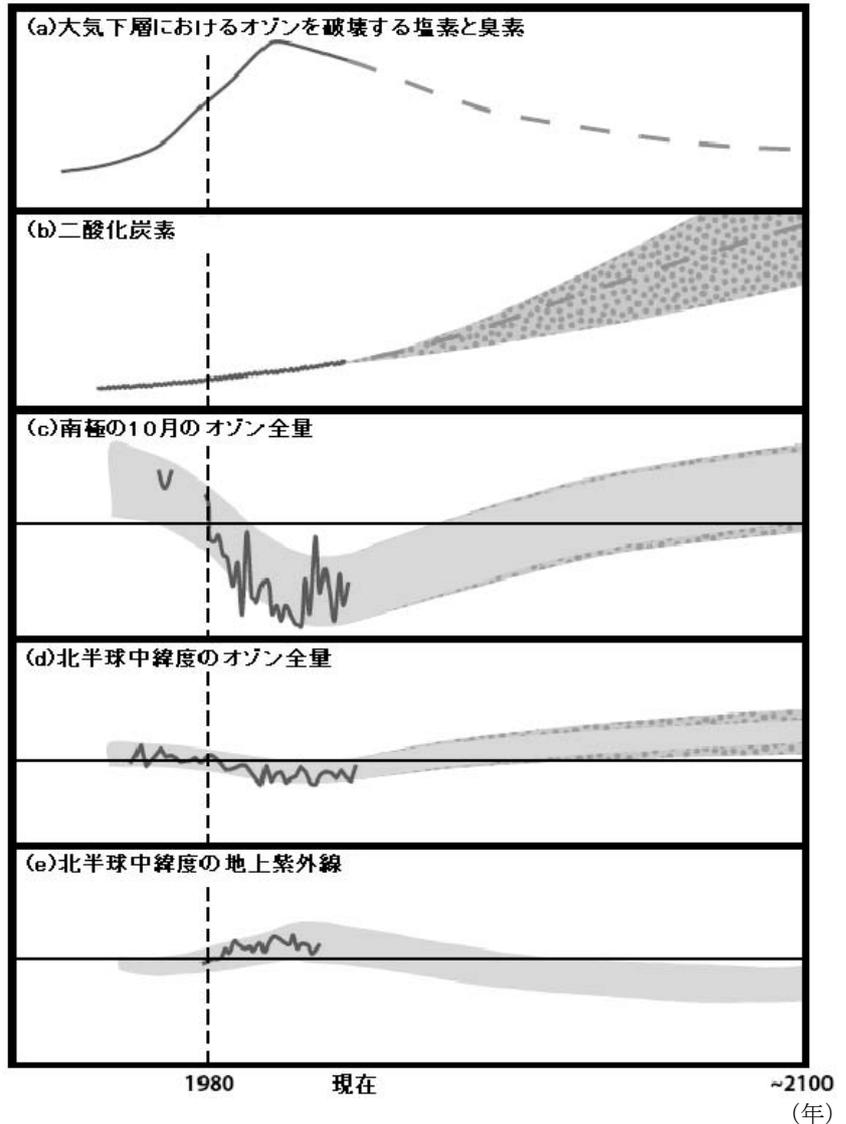


図 4-21 オゾン層破壊物質と気候変化が成層圏オゾン層に及ぼす影響とオゾンの変化が地上で受ける紫外線に及ぼす影響の概念図

- (b) 二酸化炭素の大気中濃度。二酸化炭素は、成層圏を含む地球の気候を変える人為起源の主な温室効果ガスであり、濃度の変化は気候変化を間接的に表すものである。ドット模様をつけた陰影部分は、この報告書中で使われた複数の異なるシナリオによる二酸化炭素量の予測値の幅を表す。
- (c) 10月平均オゾン全量でみた南極オゾンホールのおおきさ。オゾンホールはオゾン層破壊物質によるオゾン層破壊を最も明瞭に表すものであり、大気中のオゾン層破壊物質は将来にわたってオゾンホールのおおきさと期間を決定づける主な要因であり続けると考えられている。南極のオゾン量は、21世紀末には1980年以前の値に戻ると予測されている。影を付けた部分はオゾンの年々変動の幅を示す。変化を求めるのに、オゾン層破壊物質の変化(パネル a)、二酸化炭素(パネル b の破線)、一酸化二窒素とメタンの変化(図には示さない)を考慮したシナリオを使った。ただし、全ての不確実性を網羅しているわけではない。ドット模様をつけた陰影部分は、気候シナリオの違いによる不確実性を表すが、これも全てを網羅しているわけではない。
- (d) 北緯 30~60 度間の平均のオゾン全量からみた北半球中緯度のオゾン層破壊のおおきさ。影を付けた部分はオゾンの年々変動の幅を示す。ドット模様をつけた陰影部分は、気候シナリオの違いによる不確実性を表すが、全ての不確実性を網羅しているわけではない。パネル c と d は、北半球中緯度のオゾン層破壊と南極オゾンホールの相対的な規模を表す。準 2 年周期振動(QBO)、火山噴火、太陽活動の影響は観測データから除いてある。将来予測には、火山噴火や太陽活動の変動の影響は考慮していない。北半球中緯度でオゾン層

が 1980 年以前のレベルに戻るのがいつになるのかを判断するのは自然変動があるために難しいが、気候変化のためにこの回復時期が数十年早まり、21 世紀半ばより前になる(成層圏の塩素と臭素の量が 1980 年レベルに戻るより前であり、パネル c に示した南極オゾンが回復する時期よりも早い)と予測されている。

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

5. 政策決定者向けの情報と政策策定のための選択肢

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

(1) 政策決定者向けの情報

- ・ モントリオール議定書は、オゾン層を保護すると同時に、気候変化の緩和という大きな副次効果をもたらした(図 4-20 の中段・下段参照)。オゾン層破壊物質の生産と消費が段階的に廃止され、成層圏オゾン層が保護されてきた。もしオゾン層破壊物質の放出が規制されずに増加し続けていたら、今後数十年間に、これまで観測されたよりもはるかに大規模なオゾン層破壊が起こり、地上に到達する紫外線も大きく増えたであろうということを、モデルを用いたシミュレーション結果は示している。
- ・ HFC 類の規制が行われないと仮定したシナリオによれば、地球温暖化係数を考慮した放出量は、2050 年までに 1988 年のピーク時の CFC 類に匹敵するようになると予測される(図 4-20 の下段参照)。図中で予測の上限は、現在使われているのと同じくらいの HFC 類を開発途上国が使うようになると仮定したケースを示したものである。
- ・ 2007 年にモントリオール議定書の締約国が合意したとおりに HCFC 類の段階的廃止が前倒しされると、オゾン層破壊の緩和と気候強制力の減少が促進されると予測される(図 4-20 を参照)。すなわち、オゾン層破壊係数を考慮した排出量に換算すると、2011~2050 年の累積で約 70 万トン相当の HCFC 類の排出が削減され、等価実効成

層圏塩素 (EESC) が 1980 年レベルに回復するのが 4~5 年早まることになる。また、二酸化炭素に換算すると、2011~2050 年の平均で年あたり約 5 億トン相当の温室効果ガスの放出が削減されることになる。それがどれだけの利益をもたらすかは、HCFC 類の代替物質が気候にどれだけ影響を及ぼすかによる。なお、人為起源の二酸化炭素放出量は、2008 年現在、全世界で年あたり 300 億トンを超える。

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

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

- ・ 二酸化炭素やメタンのような放射への影響が大きい物質の量が増加すると、気温・風・化学過程に影響がおよび、その結果将来の成層圏オゾン量に大きく影響すると予測されている。大気中の二酸化炭素は 2005~2008 年に年間 2.1ppm の割合で増加し、メタンは 2006~2008 年に年間 6.7ppb の割合で増加した。
- ・ 一酸化二窒素 (N₂O) は、オゾンを破壊する物質であるとともに気候を温暖化する効果をもつ物質としても知られている。オゾン層破壊係数で重み付けした場合、その人為起源の放出量は、現在、全てのオゾン層破壊物質の中で最大である。
- ・ 気候を調節する手法 (ジオエンジニアリング) の一つとして、硫黄を含む化合物を大量に成層圏へ放出させる技術が提案されているが、この手法を用いた場合に成層圏の放射的・力学的・化学的な状態が変化し、成層圏オゾン量に意図しない重大な影響が生じる可能性がある。

(2) 政策策定のための選択肢

様々な物質をさらに規制した場合にどのような効果が表れるのかを示すため、複数の追加的なシナリオが作成された。下に示す表 4-14 では、それぞれのシナリオを仮定した場合に達成できる塩素と臭素を合わせた存在量および二酸化炭素換算した放出量の、基本シナリオからの削減量を示している。

- ・ **ハロン類と CFC 類：**
 オゾン層破壊係数で重みづけした場合、オゾン層破壊物質の放出量の中で、貯蔵物からの漏出が現在最も多くを占めている。CFC 類の貯蔵分の回収と破壊が 2011 年から 2015 年に遅れると、オゾンと気候に対する好ましい効果が約 30%減ると推定されている。
- ・ **四塩化炭素 (CCl₄)：**
 2010 年以降の CCl₄ の放出が全廃されれば、それが EESC に与える効果は、CFC 類とハロン類の貯蔵分を回収・破壊するのと同等になる。放出量の推定値を見直したため、この効果は、前回のアセスメントに比べ、かなり大きくなっている。
- ・ **HCFC 類：**
 開発途上国における HCFC 類の最近の生産量は、報告量でみると前回のアセスメントで予測したよりも大きく増加している。そのことだけを考慮した場合には、新しい基本シナリオでの HCFC 類生産量は前回アセスメントより大きくなりそうだが、ここでは 2007 年にモンテリオール議定書締約国が合意した HCFC 類の段階的廃止の前倒しによる削減効果の方が大きくなると想定されている。
- ・ **塩素と臭素を含むオゾン層破壊物質の 2010 年以降の全廃：**
 この化合物を全廃することにより、EESC が 1980 年レベルに回復する時期が約 13 年早まるとともに、気候への影響に関しては、2011～2050 年に二酸化炭素換算で年あたり平均約 7 億トン削減するのと同等になる。このような二酸化炭素換算で求めた温暖化への効果は、CFC 類および HCFC 類の現在の貯蔵分によるものと、将来生産される HCFC 類によるものとが同じくらいになる。
- ・ **臭化メチル：** 次の 2 つの事例について試算した。
 事例 1：検疫と出荷前処理での使用が 2011 年から段階的に廃止されることにより、2004～2008 年の平均使用量のまま維持されるのと比べて EESC が 1980 年レベルに回復する時期が 1.5 年早まる。事例 2: 規制から除外された特定用途での使用量が 2011

年に認められた量のまま無期限に継続すると、EESCの回復時期が0.2年遅れる。

表 4-14 シナリオごとの試算

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

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

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

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

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

3. UNEP 環境影響評価パネル報告書要旨(2010年)*

オゾン層破壊の環境影響：2010 アセスメント
Environmental Effects of Ozone Depletion：2010 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

オゾン層破壊と気候変化

・オゾン層破壊及び温室効果ガス（GHGs）の増大に起因する気候変化の間には強い相互作用がある。オゾン層の破壊は気候に影響を与え、気候変化はオゾン層に影響を与える。モントリオール議定書の実施の成功は気候変化に顕著な影響を与えてきた。計算によると、クロロフルオロカーボン（CFCs）の段階的削減は、GHGs を削減するための京都議定書に基づく対策よりも遥かに大きく地球の温暖化効果（即ち、放射強制力）の低減に効果があった。GHGs の濃度の増大は、成層圏における温度低下と循環の加速をもたらし、熱帯地方におけるオゾン全量を減少させ、中／高緯度域におけるオゾン全量を増やす方向に働くことで、成層圏でのオゾン量に影響を及ぼす。オゾン層の変化に起因する循環の変化は地表の風と降雨のパターンにも影響を与える可能性がある。

・モントリオール議定書は機能しているが、オゾン層が 1980 年代のレベルに戻るには今後数十年はかかるであろう。オゾン層破壊物質の濃度は 1990 年代にピークに達した後、減少している。またオゾン全量ももはや減少していない。中緯度域のオゾン量は以前の予測より早く、今世紀半ばまでには 1980 年のレベルに戻ると予想される。しかし、高緯度域では回復率がもっと遅いと思われる。春季のオゾン層破壊は引き続き極域で起こり、特に南極域で今後数十年にわたると予想される。

・オゾン層破壊の抑制にモントリオール議定書が成功したために、UV-B 量の増大は南極オゾンホールの影響を受ける地域の外側では小さく、UV-B 量の増加を観測するのはむずかしい。雲やエアロゾルなどオゾン以外の要因のために UV-B 量の変動は大きい。オゾン層破壊の結果として発生したであろう UV-B 量の増加を確認するために使用可能な長期的

* 環境省による仮訳

な観測は少ない。中緯度域では、UV-B 放射照度の増加は現在のところ 1980 年に比べても <5%ほどであるが、オゾン層破壊が激しい高緯度域／極域では UV-B の増加はもっと大きい。南極では太陽高度が低いにもかかわらず、オゾンホールが形成されている晩春における UV-B の放射線量は日焼けを引き起こすのに十分となる可能性があり、オゾン層破壊が始まる前の 2 倍にはなっている。残念ながら、この変化を確認するためのオゾンホール発生以前の観測は存在しない。

・モントリオール議定書がなければ、北半球中緯度域での日焼けを起こす紫外線量のピーク値は 2065 年までに 3 倍になっていた可能性がある。これは環境と人体の健康に重大な影響を与えることになったであろう。この状況は、晴れた日の紫外線はオゾン層破壊が問題となる以前よりも若干高い程度であり、中／高緯度域では今後数十年の間に減少すると予想される現在の状況と大きく異なっている。

・オゾン層と雲で予想される変化は、紫外線量が既に低い高緯度域における紫外線を大きく減少させ、紫外線量が既に高い低緯度域では紫外線をわずかに増加させる可能性がある。これは人体の健康と生態系に大きな影響を与える可能性がある。UV-B 量は、1980 年と比較して、21 世紀末には中／高緯度域ではそれぞれ 5%から 20%まで低くなり、低緯度域では 2~3%高くなると予測されている。しかしこれらの予測結果の扱いには注意が必要である。何故なら、UV-B 量の変化予測は雲量、大気汚染物質及びエアロゾルの変化にも強く依存するが、これらの因子は気候の変化に影響を受け、また将来の変化量には不確実性が存在するからである。このような紫外線量の変化予測に基づくと、低緯度域では皮膚損傷のリスクは大きくなると思われるが、高緯度域での UV-B に起因するビタミン D の十分な生成のための最適ばく露時間の設定は難しい。

・将来の紫外線予測には不確実な部分があり、モデル化と観測の努力を継続することが必要である。オゾン層破壊と気候変化の間に強い相互作用があることや観測やモデルに不確実性があることが、将来の紫外線放射照度の予測に対する信頼性を限定的なものに留めている。従って、将来の紫外線量の変化に関連するプロセスの理解を深めことや、オゾン層と地上紫外線の分光放射照度の地上及び衛星からの観測を継続することが重要である。これにより、将来の予想外の変化を監視し、変化に対応することが可能となる。

人体の健康

・太陽の UV-B 放射の健康へのリスクに関しては、白内障と皮膚がんが最も高い信頼性で評価できる。感染症の発症リスクを高める懸念はあるが、公衆衛生上の指針を出すにはデータが不足している。白内障と皮膚がんの罹患率は多くの国で引き続き上昇しており、社会的影響と医療コスト増大が問題となっている。一部の地域では、小児や若者における黒

色腫の罹患率はもはや増加しておらず、或いは罹患率の増加はより死亡率の低い腫瘍に限定されている。こうした変化は恐らく適正な研究結果に基づく強力な公衆衛生情報キャンペーンの成果を反映したものであろう。感染症の場合、動物実験を除くと白内障や皮膚がんと同じような人の研究結果は得られていない。オゾン層破壊物質の代替物の使用は健康へのリスクを生み出す可能性があるが、これらはまだ定量的に評価されていない。

・日光ばく露が健康に与える良い点は、主として太陽の UV-B 放射による皮膚のビタミン D 生成である。最適のビタミン D レベルは骨の健康を維持し、ある種の肉臓がん、自己免疫疾患、感染症及び心血管系疾患のリスクを減らす可能性があると考えられている。経口補給されたビタミン D にも紫外線により生成されるビタミン D と同様の利点があるかどうか、また、ビタミン D の大量摂取が常に望ましいかどうかはまだ明らかではない。リスクと利益のバランスを考えた適正な日光のばく露は、遺伝学的な背景（皮膚の色、ビタミン D 受容体の種類を含む）及び外的／環境要因（食生活、季節、日時、緯度を含む）などの個人的な特性で異なってくる。健康影響を考慮したビタミン D の適正量と紫外線ばく露に関しては、現在活発に研究が行われている分野であり、いずれ日光ばく露によるリスクの最小化と便益をうまくバランスをとるための指針を一般大衆へ提供することとなるであろう。

・太陽の紫外線放射と気候の複合変動が健康に与える影響については見掛け上信頼できるものである。医療に関する意思決定と将来の医療政策の指針となる方向性を持った調査が必要である。温度が高くなれば、同じ紫外線放射にさらされてもより多くの皮膚がんを引き起こすことになる。しかし、それ以上の調査は行われていないので、これが複合効果について現在のところ言える最も断定的な表現である。温度が上がると太陽のばく露パターンが変わる可能性があるが、気候変化に対応する将来の人の行動パターンをモデル化するには相当な不確実性がある。複合効果は深刻なものになり得ると疑うに十分な情報があるが、厳格なリスク推定を行うにはまだデータ不足である。

陸域生態系

・オゾン層破壊が顕著な地域では、UV-B 放射の増大が陸域植物の生産を約 6%減少させることが広範囲の野外調査の結果から示唆されている。この減少は植物の直接的な損傷の結果であったり、植物を UV-B から保護し、UV-B に順応する方向に植物資源の使用を大きく転換した結果でもある。植物の成長減少が長期間続くと、その影響は、特に植物が大気中の炭素を隔離（回収）する機能をもっているという点で重大なものとなる可能性がある。

・地球規模の環境変化に起因する紫外線放射の変化は陸域生態系に極めて重大な結果をも

たらず可能性がある。今後数十年間に予測される（乾燥又は森林伐採の増大に対応する）雲量及び植生の地域特有の変化は、陸域生物の受ける紫外線放射のレベルに大きな影響を与える可能性がある。紫外線放射（UV-B と UV-A の双方）のこうした変動は広範囲の生態系に影響を与えることになる。

・予想される気候の変化は紫外線放射に対する植物及び生態系の反応を変える可能性がある。例えば、中程度の乾燥は植物の紫外線への感受性を減少させる可能性があるが、気候変化によって更に降水量が減少し温度が上昇すると、植物の成長が抑えられ、紫外線放射及びその他の気候要因から防御するための植物の資源再配分が危うくなる可能性がある。従って、たとえ限られた気候変化であっても、その変化は特に苛酷な環境下では生存に影響を与えるだろう。

・紫外線放射は枯れた植物の分解を早め、その結果として炭素の大気中への放出を促進する。低／中緯度域では、雲量の減少と集約的な土地利用の増大によって、紫外線放射にさらされる植物と土壌が将来的には増える可能性がある。枯れた植物の太陽光の働きによる分解（光分解）は、特に微生物の作用により極めてゆっくりとしか腐敗しない成分の場合、多くの環境中で非常に重要な生態学的過程となる。

・気候変化とオゾン層破壊に起因する UV-B 放射の変動は、植物と害虫との相互作用に大きな影響を与え、食物の量と質に重大な影響を与える。草食動物（例えば、昆虫）による植物の消費は、通常の場合 UV-B レベルが高くなれば減少する。今後数十年の間に、大気中の二酸化炭素濃度が高まり、植物密度が増大すれば、UV-B 放射量の増加によって草食性昆虫等による食害が減少する可能性が打ち消される可能性がある。

・UV-B 放射は例えば抗酸化活性、風味及び繊維含有量の増大を通じて食糧の質を改善する可能性がある。この分野で得られた知識は、栄養価を高めるためにこれら天然の植物生産物を利用する農業システムの組み立てに使われる可能性がある。

・太陽の UV-B 放射は微生物の生物多様性を変え、結果として土壌の肥沃度と植物の病気に影響を与える。枯れた植物体上の微生物群の構成の変化は腐植率を変える可能性がある（土壌の肥沃度に貢献する重要な生態学的過程）。生きた植物では、UV-B 放射による微生物の種構成の変化は菌類感染の感受性に影響を与えうる。

水圏生態系

・太陽からの UV-B 放射による有害な影響は水圏生物で立証されている。それと対照的に、生物多様性や種組成への影響、又は自然生態系における栄養段階間の相互作用に関する情

報は比較的少ない。

- ・ある水圏生物では、UV-B に起因する負の影響は環境汚染によってさらに悪化する。原油或いはカドミウム、セレン、銅などの重金属で汚染された現場では、UV-B 放射は水圏生物に対してより重大な影響を与える。

- ・気候変化は水圏生物の深度分布並びに水の透明度に影響を与えるので水圏生物の太陽紫外線放射ばく露を変えるであろう。気候変化によってもたらされる気温の上昇は表層混合層の深さを浅くする傾向があるので、生物をより高い照度にさらすことになる。内陸水系及び沿岸部において、溶存有機物 (DOM) は紫外線の透過性に影響を与える主要な要素である。ある地域では、DOM の濃度が過去 20 年間でほぼ 2 倍となっている。人間の水生病原体は太陽紫外線の放射に敏感であるため、DOM の変化はそれらへのばく露や免疫不活性化を変えてしまう可能性がある。

- ・増加した太陽 UV-B の放射は、地球規模の温度上昇とともに生態学的にも経済的にも重要である海藻に負の影響をあたえるかもしれない。海藻の生態系における鉛直分布は太陽紫外線の放射の強い影響を受ける。褐藻及び紅藻の幼体はこれらの環境要素によって害を受ける。

- ・気候変化に起因する環境変化は太陽紫外線放射に適応するための水圏生物の防御戦略能力を超える。種の違いによって光保護、光回復など回避戦略の組合せが異なり、それによって高い太陽紫外線の放射に適応するそれぞれの能力の限界が決まる。海洋及び内陸の両方の生態系において生体量の主要な生産者である藍藻は、太陽紫外線の放射に敏感であるが、他の種は適応戦略のいろいろな組合せを使って、極度の UV-B 照射、頻繁な乾燥及び極度の高温といった生育環境でも生き残ることができる。

- ・大気中の CO₂ 濃度が上昇すると水の酸性度も上がり、石灰性生物は太陽からの UV-B 放射により脆弱になる。海水の酸性化が続けば、植物プランクトン、海藻、珊瑚など石灰性生物の炭酸塩の取り込みを阻害する。

生物地球化学的循環

- ・炭素循環を駆動するプロセスに対する太陽紫外線と気候変化の影響の間には相互作用がある。これらの相互作用は大気中の CO₂ の増加の速度とそれによる地球温暖化を現在の予測以上に加速させるかも知れない。

- ・地中海や北米西部の様なより温暖でより乾燥した気候への移行は、紫外線による陸域大

気への炭素の放出を増加させるであろう。枯れ葉などの紫外線による分解は大気への CO₂ 放出の経路としてもっと重要になるだろう。

- ・中／高緯度海洋地域では、大気中の CO₂ を吸収する能力が減退している。この減退は主として、海洋における光合成と関連する CO₂ 吸収プロセスに対する気候変化と太陽紫外線の負の影響によるものである。

- ・気候変化に関連して予想される北極とアルプス山脈から水圏生態系への流出水の増加は、紫外線による土壌有機炭素の分解とそれによる CO₂ の大気への放出を加速させるであろう。流出水の増加は水の透明度を減らし、それによって淡水及び沿岸海洋における紫外線ばく露を減らす。

- ・CO₂ 以外の温室効果ガスに係わるフィードバックは、紫外線と気候変化の相互作用により増大している。例えば、気候変化に起因する海洋の貧酸素地域の増大は、重要な温室効果ガスでかつオゾン層破壊物質でもある亜酸化窒素 (N₂O) の放出を促進する。

- ・オゾン層の回復で引き起こされる地球表面に到達する太陽 UV-B 強度の一層の減少は、有機／無機汚染物質の光化学的反応を抑える可能性がある。この影響は有機汚染物質の残存量とばく露濃度を増大させる可能性がある。他方、金属の場合には、紫外線に起因する金属の変質が、しばしばその有毒性を高めるため、光化学反応が抑えられることは有益に働くかも知れない。

大気質

- ・人体の健康及び環境に対する大気汚染の影響は、将来の気候や汚染物質の排出や成層圏オゾンの変化に直接的に影響される。紫外線は対流圏でのオゾンとエアロゾルを含む光化学的スモッグの生成の支配的要素の一つである。また紫外線は大気中の多くの気候関連／オゾン関連のガスの量を制御する水酸基 (OH) の生成の引き金にもなっている。汚染物質の化学過程及び風による輸送の定量化にはまだ不確実性が存在する。将来の紫外線や気象条件や人為的排出の変化に伴う正味の影響は大きいと思われるが、一方でその影響は局所的な状況に依存する。このことが大気質の予測と管理に対する挑戦となる。

- ・数値モデルでは、将来の紫外線と気候の変化は水酸基 (OH ラジカル) のトレンドと空間分布を変えると予測している。OH ラジカルの変化は、いくつかの温室効果ガスの存在量に影響するだけでなく、都市スケールならびに地域スケールの光化学スモッグ生成にも影響を与えるだろう。OH ラジカルの濃度は 2100 年までに地球規模では平均で 20% 低下すると予想される。一方で、局所的な濃度の変化は一様ではなく、現在の濃度よりも 2 倍

あるいは 1/2 にも上下することが予想される。しかし、限られた数の事例研究においては、OH ラジカル濃度についてモデル計算と実測値の間に大きな違いが認められている。このことは我々が大気中での OH ラジカルの化学を充分には理解していないことを示している。従って、人体の健康と環境に対する影響は不確実である。

・汚染物質の放出、化学過程、ならびに気候変化の相互作用のため、低・中緯度のある地域で今後 20~40 年にわたって、光化学的に生成される対流圏オゾンが増加すると予想される。化石燃料の燃焼、バイオマス燃焼及び農業活動からの人為的大気汚染物質の排出が増加を続ければ、対流圏オゾンの濃度は増大するであろう。気候に起因する温度と湿度の上昇も汚染地域における対流圏オゾンの生成を増大させるが、もっと汚染の少ない地域では対流圏オゾンの生成は減少するであろう。一部土壌では温度上昇により窒素酸化物 (NO_x) 及び生物起源の揮発性有機化合物 (VOCs) の排出量が増える。この傾向は対流圏でのオゾンのバックグラウンド濃度を増す方向に働くだろう。人の健康と環境に対する今後の保護にとって、人間活動に関連する NO_x と VOCs の排出についてもっと効果的な規制策を検討する必要がある。

・有機物質で構成されるエアロゾルは気候と大気質で大きな役割を果たしており、大気圏でのエネルギー収支に関する大きな不確実性の原因となっている。大部分のエアロゾルは人為的発生源や生物由来の発生源から放出される揮発性有機化合物の紫外線誘起の酸化過程を経て生成される。しかしながら、エアロゾル生成に関わる化学過程の詳細はまだよく知られておらず、現在のモデルは (揮発性有機化合物の酸化過程を経て生成される) 有機性のエアロゾル量を過少予測している。有機性のエアロゾルの大気質における重要性を評価し、気候に対する直接的/間接的な放射強制力をもっとよく定量化するためには、有機性のエアロゾルの生成過程、化学組成及び光学的特性をもっと理解する必要がある。

・オゾン層破壊物質の代替物の分解では、ある種の化学物質が生成されるが、人体の健康と環境に対する関連性はほとんど見つかからない。オゾン層を破壊する CFCs の代替物として使わ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) は分解してトリフルオロ酢酸 (TFA) を生成する。TFA は非常に安定で、海洋、塩水湖、プラヤに蓄積される。しかし、過去の使用量及びフルオロオレフィンなど新規市場参入商品を含む将来の使用予測に基づけば、これら代替品の環境中での消失に伴って生成される TFA 及びモノフルオロ酢酸 (MFA) の増量はそれほど大きくはない。自然発生源からの既存の量を加えても、人体及び水生環境における生物に対する TFA (及び、より有毒な MFA) のリスクは無視できると判断される。

材料

・環境温度の上昇は紫外線に起因するプラスチックと木材の劣化を加速させ、それによりそれらの屋外における有効寿命を短くする。自然及び人工の材料は屋外の建造物、農業、その他の用途で広く使われている。高温での劣化速度の増大は個々の材料、紫外線照射環境及びばく露の地理的位置によって異なる。

・現在利用可能な安定化技術でも、日常的に太陽紫外線の放射にさらされるいくつかの種類
の通常ポリマーへの損害を軽減できる。最新式の安定剤、表面被覆及び材料置換の技術は紫外線の放射と温度を高めている環境の有害な影響を制御できるが、それはいくつかの種類
の通常プラスチックに限られる。

・屋外用での使用が増えているプラスチックナノ複合材及び木材／プラスチック複合材は
在来の材料に比べて太陽紫外線の放射への安定性が比較的高いようである。複合材におけ
るナノフィラーの使用は在来の複合材に比べて性能が優れているため増えている。木材／
プラスチック複合材は、プラスチック単体と比べて紫外線安定性は同等であるが、それ
でも高い湿度での寿命の短縮に悩まされている。

4. 参考文献

- 環境省. 2009. 化学物質ファクトシート (2011 年度版).
<http://www.env.go.jp/chemi/communication/factsheet.html>
- 環境省. 2008. 紫外線環境保健マニュアル. 45p.
- 環境省. 2006. 平成 17 年度フロン等オゾン層影響微量ガス等監視調査.
- 環境省. 2011. 平成 22 年度フロン等オゾン層影響微量ガス等監視調査.
- 気象庁. 1993-2011. オゾン層観測報告.
- 気象庁. 2002. 大気・海洋環境観測報告 (2000 年観測成果) . 157p.
- 国立環境研究所. 2011. 4. 6. 北極圏上空で史上最大のオゾン破壊が進行中 —ヨーロッパやロシアの一部が影響下に— (プレスリリース).
<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20110406/20110406.html>
- 永島達也、高橋正明. 2002. 成層圏オゾン層の将来見通し—化学気候モデルを用いた評価. 天気 49 巻 11 号:937-944.
- ハロン等抑制対策連絡会. 2011. ハロン等抑制対策に関する報告書 (平成 22 年度).
- Bloom AA, Lee-Taylor J, Madronich S, Messenger DJ, Palmer PI, Reay DS, McLeod AR. 2010. Global methane emission estimates from ultraviolet irradiation of terrestrial plant foliage. *The New Phytologist* 187:417-425.
- CGER. 2007. CGER's supercomputer activity report vol14-2005. 154 p.
- Chipperfield MP, 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), 1389-3p. doi:10.1029/2002GL016353.
- Corr CA, Krotkov N, Madronich S, Slusser JR, Holben B, Gao W, Flynn J, Lefer B, Kreidenweis SM. 2009. Retrieval of aerosol single scattering albedo at ultraviolet wavelengths at the T1 site during MILAGRO. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9:5813-5827.
- Engel A, Möbius M, Bönisch H, Schmidt U, Heinz R, Levin I, Atlas E, Aoki S, Nakazawa T, Sugawara S, Moore F, Hurst D, Elkins J, Schauffler S, Andrews A, Boering K. 2009. Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years. *Nature Geoscience* 2:28-31.
- Estupinan G, Raman S, Crescenti GH, Streicher JJ, Barnard WF. 1996. Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *Journal of Geophysical Research* 101:16807-16816.
- Ferretti DF, Miller JB, White JWC, Lassey KR, Lowe DC, Etheridge DM. 2007. Stable isotopes provide revised global limits of aerobic methane emissions from plants. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7:237-241.
- Hadjinicolaou P, Pyle JA, Harris NRP. 2005. The recent turnaround in stratospheric ozone over northern middle latitudes: A dynamical modeling perspective. *Geophysical Research Letters* 32:12821. doi:10.1029/2005GL022476.

- Hayashi LC, 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.
- Hofzumahaus A, Rohrer F, Lu KD, Bohn B, Brauers T, Chang CC, Fuchs H, Holland F, Kita K, Kondo Y, Li X, Lou SR, Shao M, Zeng LM, Wahner A, Zhang YH. 2009. Amplified trace gas removal in the troposphere. *Science* 324:1702-1704.
- Keppler F, Hamilton JTG, Brass M, Rockmann T. 2006. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature* 439:187-191.
- Lelieveld J, Butler TM, Crowley JN, Dillon TJ, Fischer H, Ganzeveld L, Harder H, Lawrence MG, Martinez M, Taraborrelli D, Williams J. 2008. Atmospheric oxidation capacity sustained by a tropical forest. *Nature* 452:737-740.
- Matsunaga SN, Guenther AB, Potosnak MJ, Apel EC. 2008. Emission of sunscreen salicylic esters from desert vegetation and their contribution to aerosol formation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8:7367-7371.
- Messenger DJ, McLeod AR, Fry SC. 2009. The role of ultraviolet radiation, photosensitizers, reactive oxygen species and ester groups in mechanisms of methane formation from pectin. *Plant, Cell and Environment* 32:1-9.
- Neale PJ, Kieber DJ. 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. 61-84.
- NOAA. 2005. Northern hemisphere winter summary 2004-2005.
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/winter_bulletins/nh_04-05/index.html
- Polvani LM, Waugh DW, Correa GJP, Son SW. 2011. Stratospheric Ozone Depletion: The Main Driver of Twentieth-Century Atmospheric Circulation Changes in the Southern Hemisphere. *Journal of Climate* 24:795-812.
- Raivonen M, Bonn B, Sanz MJ, Vesala T, Kulmala M, Hari P. 2006. UV-induced NO_y emissions from Scots pine: Could they originate from photolysis of deposited HNO₃? *Atmospheric Environment* 40:6201-6213.
- Raivonen M, Vesala T, Pirjola L, Altimir N, Kerone P, Kulmala M, Hari P. 2009. Compensation point of NO_x exchange: Net result of NO_x consumption and production. *Agricultural and Forest Meteorology* 149:1073-1081.
- Ravishankara AR, Daniel JS, Portmann RW. 2009. Nitrous Oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st Century. *Science* 326:123-125.
- 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.
- Son SW. et al. 2010. Impact of stratospheric ozone on Southern Hemisphere circulation change: A multimodel assessment. *Journal of Geophysical Research* 115.D00M07. doi:10.1029/2010JD014271.
- Son SW, Polvani LM, Waugh DW, Birner T, Akiyoshi H, Garcia RR, Kinniso D, Pawson S, Rozanov E, Shepherd TG, Shibata K. 2008. The impact of stratospheric ozone recovery on the Southern Hemisphere westerly jet. *Science* 320:1486-1489.

- Tanimoto H. 2009. Increase in springtime tropospheric ozone at a mountainous site in Japan for the period 1998-2006. *Atmospheric Environment* 43:1358-1363.
- Tatarov B, Nakane H, Park ChB, 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.
- Thompson DWJ, Solomon S. 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change, *Science* 296:895-899.
- UNEP. 1989. Environmental effects panel report.
- UNEP. 1995. Environmental effects of ozone depletion: 1994 assessment.
- UNEP. 1999. Environmental effects of ozone depletion: 1998 assessment. 193p.
- UNEP. 2003. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2002 assessment. 209p.
- UNEP. 2005. Production and consumption of ozone depleting substances under the Montreal Protocol 1986-2004. 75p.
- UNEP. 2007. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2006 assessment. 209p.
- UNEP. 2011. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2010 assessment. 236p.
- Volkamer R, Jimenez JL, San Martini F, Dzepina K, Zhang Q, Salcedo D, Molina LT, Worsnop DR, Molina MJ. 2006. Secondary organic aerosol formation from anthropogenic air pollution: Rapid and higher than expected. *Geophysical Research Letters* 33: L17811.
- Watanabe YW, Yoshinari H, Sakamoto A, Nakano Y, Kasamatsu N, Midorikawa T, Ono T. 2007. Reconstruction of sea surface demethylsulfide in the North Pacific during 1970s to 2000s. *Marine Chemistry* 103:347-358.
- West SK, Longstrth JD, Munoz BE, Pitcher, HM, Duncan DD. 2005. Model of risk of cortical cataract in the US population with exposure to increased ultraviolet radiation due to stratospheric ozone depletion. *American Journal of Epidemiology* 162 (11):1080-1088.
- WHO, WMO, UNEP, NIR. 2002. Global solar UV index - A practical guide. 28p.
- WMO. 2007. Scientific assessment of ozone depletion: 2006.
http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2006/ozone_asst_report.html .
- WMO. 2011. Scientific assessment of ozone depletion: 2010
http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/SAP/Scientific_Assessment_2010/index.shtml
- Zeng G, Morgenstern O, Braesicke P, Pyle JA. 2010. Impact of stratospheric ozone recovery on tropospheric ozone and its budget. *Geophysical Research Letters* 37: L09805.
- Zepp RG, Shank GC, Stabenau E, Patterson KW, Cyterski M, Fisher W, Bartels E, Anderson SL. 2008. Spatial and temporal variability of solar ultraviolet exposure of coral assemblages in the Florida Keys: Importance of colored dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography* 53:1909-1922.

5. 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
BAPMoN	Background Air Pollution Monitoring Network	大気バックグラウンド汚染監視網
CCM	Chemistry Climate Model	化学気候モデル
CDOM	Colored Dissolved Organic Matter	有色溶存有機物
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
CPD	Cyclobutane Pyrimijine Dimer	シクロブタン型 2 量体
CTM	Chemical Transport Model	化学輸送モデル
DLR	Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt	ドイツ航空宇宙センター
DMS	Dimethylsulphide	硫化ジメチル
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
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
HABs	Harmful Algal Blooms	ハームフル・アルガル・ブルーム
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
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
MED	Minimum Erythema Dose	最少紅斑量
MLS	Microwave Limb Sounder	マイクロ波リム放射サウンダー
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
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
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
SAP	Scientific Assessment Panel	科学評価パネル
SBUV	Solar and Backscatter Ultraviolet	太陽・後方散乱紫外分光計
SOA	Secondary Organic Aerosol	二次有機エアロゾル
SRES	Special Report on Emissions Scenarios	排出シナリオに関する特別報告
SVOC	Semivolatile Organic Compounds	半揮発性有機化合物
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
VOC	Volatile Organic Compounds	揮発性有機化合物
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・紫外線資料センター
XPS	Extruded Poly-Styrene	押出法ポリスチレンフォーム