

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	2018 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
					モントリオール 議定書附属書	2018 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	52	1	1	4,750
		CFC-12	CF ₂ Cl ₂	102	1	0.81	10,900
		CFC-113	C ₂ F ₃ Cl ₃	93	0.8	0.82	6,130
		CFC-114	C ₂ F ₄ Cl ₂	189	1	0.50	10,000
		CFC-115	C ₂ F ₅ Cl	540	0.6	0.26	7,370
	グループ II (ハロン)	ハロン-1211	CF ₂ BrCl	16	3	7.7	1,890
ハロン-1301		CF ₃ Br	72	10	19.0	7,140	
ハロン-2402		C ₂ F ₄ Br ₂	28	6	15.7	1,640	
附属書 B	グループ I (その他の CFC)	CFC-13	CF ₃ Cl	640	1	1.0	14,400
		CFC-111	C ₂ FCl ₅	—	1	—	—
		CFC-112 等 10 物質	C ₂ F ₂ Cl ₄	63.6	1	−0.98	—
	グループ II	四塩化炭素	CCl ₄	32	1.1	0.89	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	0.17	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	CHFCl ₂	1.7	0.04	0.036	—
		HCFC-22	CHF ₂ Cl	11.9	0.055	0.034	1,810
		HCFC-123	C ₂ HF ₃ Cl ₂	1.3	0.02-0.06	0.01	77
		HCFC-124	C ₂ HF ₄ Cl	5.9	0.02-0.04	0.022	609
		HCFC-133	C ₂ H ₂ F ₃ Cl	3.1	0.02-0.06	0.017	—
		HCFC-141b	CH ₃ CFCl ₂	9.4	0.11	0.102	725
		HCFC-142b	CH ₃ CF ₂ Cl	18	0.065	0.057	2,310
		HCFC-225ca	CF ₃ CF ₂ CHCl ₂	1.9	0.025	0.025	122
		HCFC-225cb	CF ₂ ClCF ₂ CHClF	5.9	0.033	0.033	595
		等 40 物質			他		
	グループ II (ハイドロブロモフルオロカーボン)	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	—	0.12	—
	附属書 E		臭化メチル	CH ₃ Br	0.8	0.6	0.57
附属書 F		気候変動枠組条約における削減対象の HFC (HFC-161 を除いた 18 物質)					

*「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。
「地球温暖化係数」とは CO₂ を 1 とした場合の温暖化影響の強さを表す値。

(2) 気候変動枠組条約における削減対象の代替フロン等 4 ガス*

京 都 議 定 書	物 質 名	化 学 式	2018 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 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	228	0	14,800
	HFC-32	CH ₂ F ₂	5.4	0	675
	HFC-41	CH ₃ F	2.8	0	92
	HFC-125	CHF ₂ CF ₃	30	0	3,500
	HFC-134	CHF ₂ CHF ₂	10	0	1100
	HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14	0	1,430
	HFC-143	CH ₂ FCHF ₂	3.6	0	353
	HFC-143a	CH ₃ CF ₃	51	0	4,470
	HFC-152	CH ₂ FCH ₂ F	—	0	53
	HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1.6	0	124
	HFC-161	CH ₃ CHF ₂	—	0	12
	HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	36	0	3,220
	HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	213	0	9,810
	HFC-236ea	CHF ₂ CHFCF ₃	11.4	0	1,370
	HFC-236cb	CH ₂ FCF ₂ CF ₃	—	0	1,340
	HFC-245ca	CH ₂ FCF ₂ CHF ₂	6.6	0	693
	HFC-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7.9	0	1,030
	HFC-365mfc	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃ CF ₃	—	0	794
	HFC-43-10mee	CHFCHFCF ₂ CF ₃	17.0	0	1,640
パーフルオロカー ボン (PFC)	PFC-14	CF ₄	>50,000	0	7,390
	PFC-116	C ₂ F ₆	>10,000	0	12,200
	PFC-218	C ₃ F ₈	2,600	0	8,830
	PFC-c318	c-C ₄ F ₈	3,200	0	10,300
	PFC-31-10	C ₄ F ₁₀	2,600	0	8,860
	PFC-41-12	C ₅ F ₁₂	4,100	0	9,160
	PFC-51-14	C ₆ F ₁₄	3,100	0	9,300
	パーフルオロシク ロプロパン	c-C ₃ F ₆	—	0	17,340
	PFC-91-18 等	C ₁₀ F ₁₈	—	0	>7,500
六フッ化硫黄	六フッ化硫黄	SF ₆	3,200	0	22,800
三フッ化窒素	三フッ化窒素	NF ₃	569	0	17,200

* 対象ガスは「地球温暖化対策の推進に関する法律施行令」の第 1 条、第 2 条のガスおよび SF₆、NF₃ とした。

** 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 4 次 IPCC 報告書の 100 年 GWP 値を採用している。

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
1982 年		南極地域観測隊員の忠鉢繁氏らがオゾンホールを発見
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） モントリオール議定書付属書 A グループ I で定められた 5 物質の 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 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らがノーベル化学賞を受賞
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を導入などを合意
		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
		「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
	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）
	10 月	モンテリオール議定書第 18 回締約国会合開催（デリー）
2007 年	6 月	「モンテ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）
2011 年	11 月	ウィーン条約第 9 回締約国会議及びモントリオール議定書第 23 回締約国会合開催（インドネシア・バリ）
	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
2012 年	11 月	モントリオール議定書第 24 回締約国会合開催（スイス・ジュネーブ）
2013 年	6 月	フロン回収・破壊法の一部改正（「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律」に名称を変更。フロン類の製造から使用、再生・破壊に至るまでのライフサイクル全体にわたる排出抑制対策の強化）
	10 月	モントリオール議定書第 25 回締約国会合開催（タイ・バンコク）
2014 年	11 月	モントリオール議定書第 26 回締約国会合開催（パリ）
	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
2015 年	4 月	フロン回収・破壊法の一部改正（フロン排出抑制法）施行
	11 月	モントリオール議定書第 27 回締約国会合開催（ドバイ）
2016 年	7 月	モントリオール議定書第 3 回特別締約国会合開催（ウィーン）
2016 年	10 月	モントリオール議定書第 28 回締約国会合開催（ルワンダ・キガリ） HFC の規制物質への追加を内容とする議定書のキガリ改正等を合意
2017 年	11 月	モントリオール議定書第 29 回締約国会合開催（モントリオール）
2018 年	7 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」の一部改正（モントリオール議定書キガリ改正の担保措置）
	11 月	モントリオール議定書第 30 回締約国会合開催（キト）
2019 年	1 月	モントリオール議定書キガリ改正の発効
	6 月	「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律」の一部改正（廃棄時回収率向上対策の強化）
	11 月	モントリオール議定書第 31 回締約国会合開催（ローマ）
2020 年	4 月	「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律」の一部改正（廃棄時回収率向上対策の強化）施行
	11 月	ウィーン条約第 12 回締約国会議及びモントリオール議定書第 32 回締約国会合開催（オンライン会合）
2021 年	10 月	ウィーン条約第 12 回締約国会議パート 2 及びモントリオール議定書第 33 回締約国会合開催（オンライン会合）
2022 年	10 月	モントリオール議定書第 34 回締約国会合開催（モントリオール）

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。2015年11月現在で締約国数は197カ国及びEUであり、全ての国連加盟国によって批准された。

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）及び2016年（キガリ改正）の7回にわたって改正・調整された。2018年8月現在で締約国数は198カ国及びEUであり、全ての国連加盟国によって批准された。

本議定書においては、

- ・ 対象物質の生産量・消費量の削減スケジュールの設定（第2条）
- ・ 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。

対象物質の生産量・消費量の削減スケジュールを図4-1に示す。

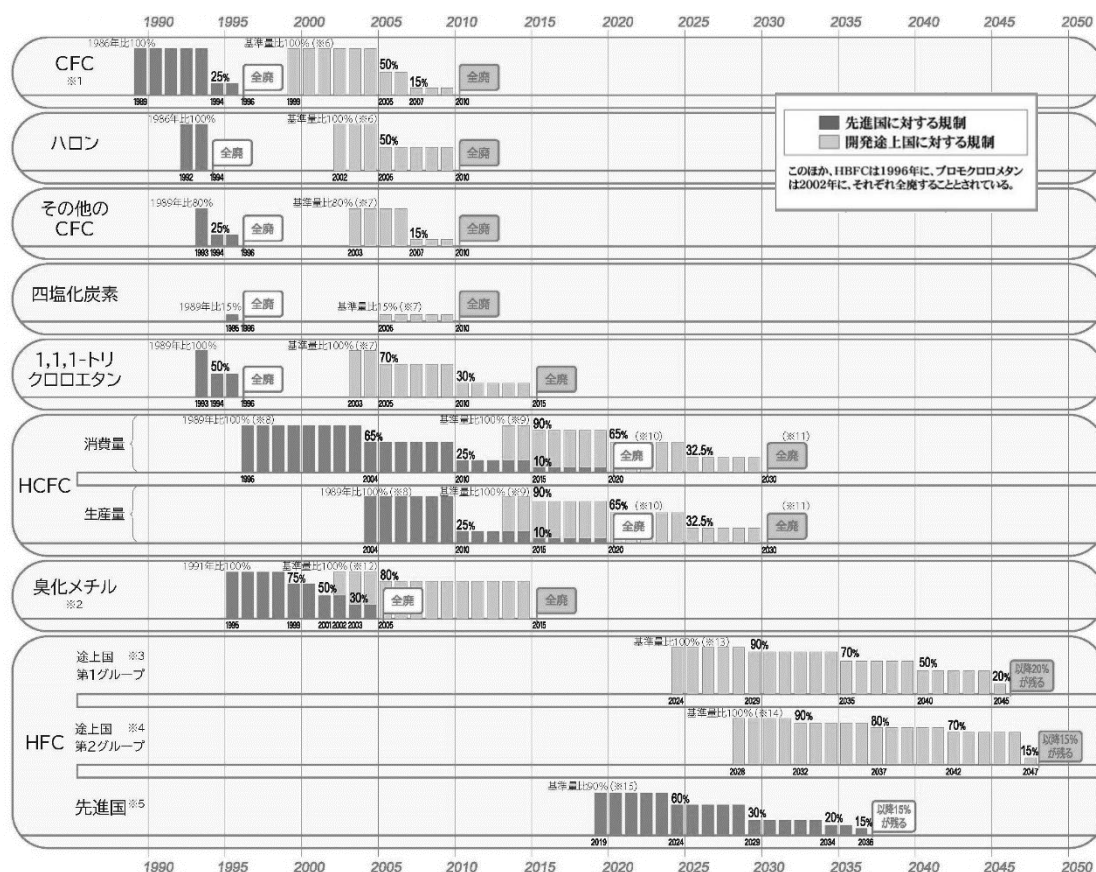


図 4-1 モントリオール議定書に基づく段階的削減スケジュール

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) 附属書 G A ループ I に定められた 5 物質(CFC-11,CFC-12,CFC-113,CFC-114,CFC-115)。

※2) 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。

※3) 途上国第 2 グループに属さない開発途上国

※4) インド、パキスタン、イラン、イラク、湾岸諸国

※5) 先進国に属するベラルーシ、ロシア、カザフスタン、タジキスタン、ウズベキスタンについては、規制措置に差異を設ける（基準値について、HCFC の算入量を基準値の 25%とし、削減スケジュールについて、第 1 段階は 2020 年に 5%削減、第 2 段階は 2025 年に 35%削減とする）。

※6) 基準量は、1995～1997 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。

※7) 基準量は、1998～2000 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。

※8) 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%。

※9) 基準量は、2009 年と 2010 年の生産量・消費量の平均値。

※10) 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。

※11) 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。

※12) 基準量は、1995～1998 年までの生産量・消費量の平均値。

※13) 基準量は、HFC の 2020 年から 2022 年の生産量・消費量の平均値 + HCFC の生産量・消費量の基準値の 65% (CO₂換算値⁵)。

※14) 基準量は、HFC の 2024 年から 2026 年の生産量・消費量の平均値 + HCFC の生産量・消費量の基準値の 65% (CO₂換算値)。

※15) 基準量は、HFC の 2011 年から 2013 年の生産量・消費量の平均値 + HCFC の生産量・消費量の基準値の 15% (CO₂換算値)。

※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。

⁵ CO₂換算値は、各生産量・消費量に 100 年間の地球温暖化係数を乗じた数値

(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

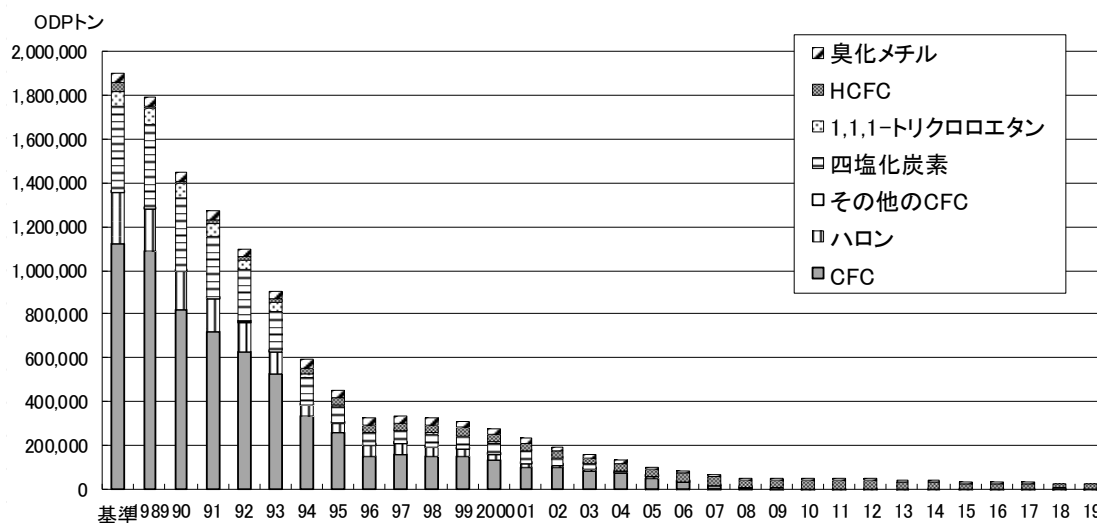


図 4-2 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の生産量の推移（1989～2019 年）
ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完（HCFC を除く）し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完（先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完）。単位は ODP トン。（出典） UNEP オゾン事務局ウェブサイト

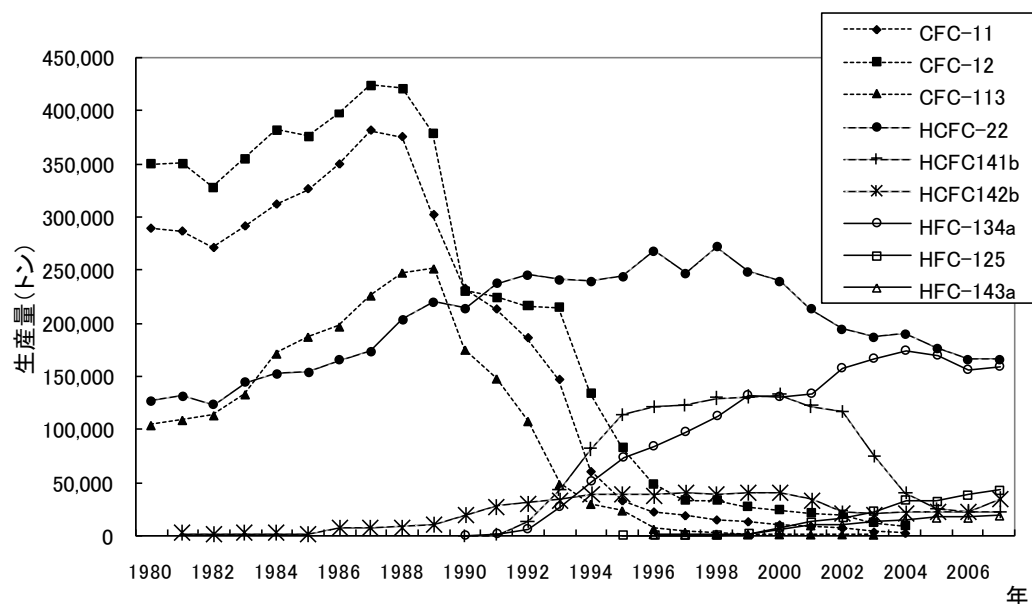


図 4-3 主要なフロン年別生産量の推移（1980～2007 年）
集計は AFEAS に登録のあったデータのみ。単位は重量トン。
（出典） The Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study（AFEAS）ウェブサイト

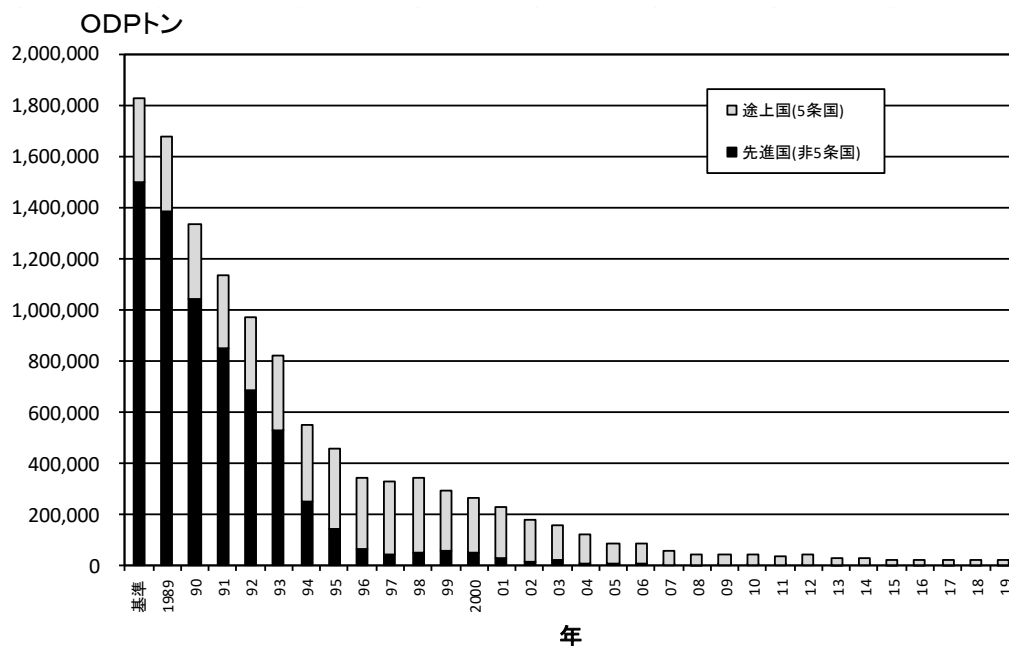


図 4-4 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の消費量の推移（1989～2019 年）
ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完（HCFC を除く）し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完（先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完）。単位は ODP トン。（出典） UNEP オゾン事務局ウェブサイト

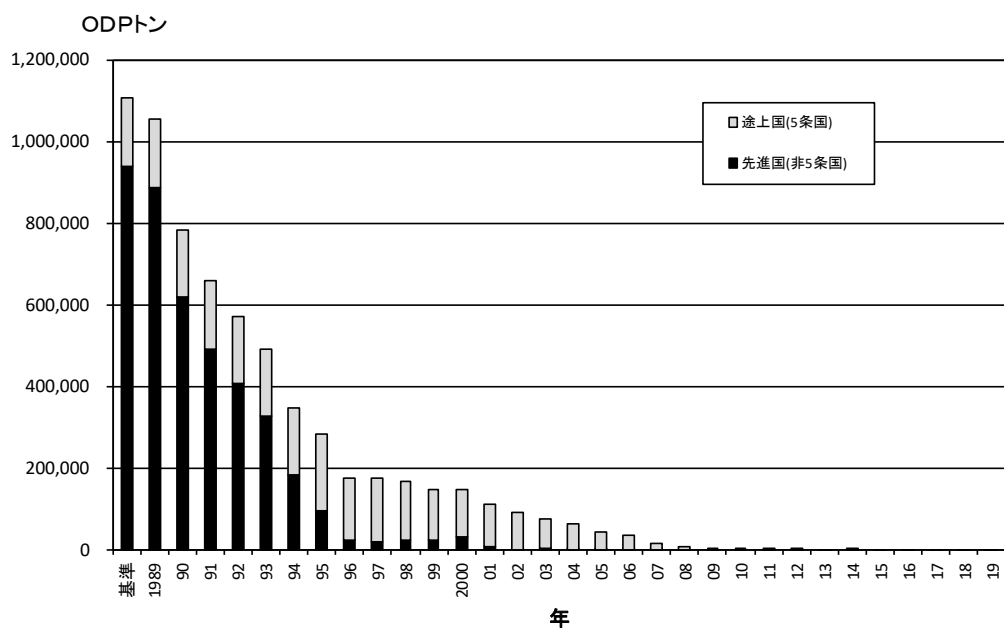


図 4-5 モントリオール議定書に基づく CFC（附属書 A グループ I）の消費量の推移（1989～2016 年）

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

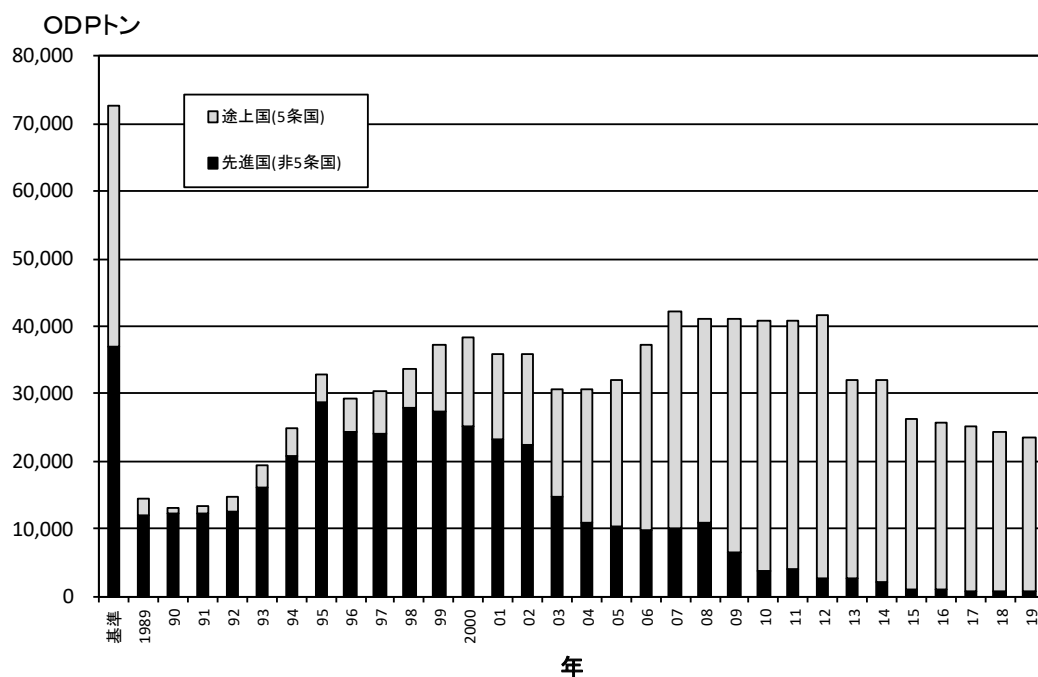


図 4-6 モントリオール議定書に基づく HCFC の消費量の推移 (1989～2019 年)

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

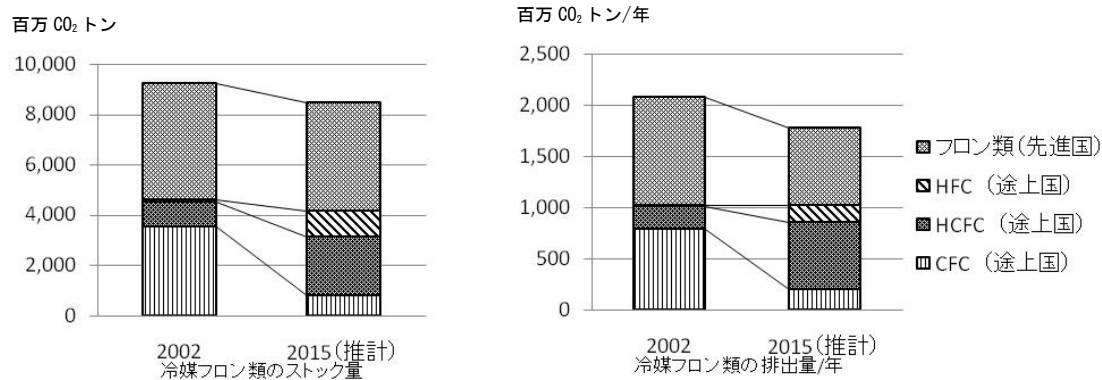


図 4-7 冷媒フロン類のストック量及び排出量/年 (2002 年・2015 年 (推計))

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を参照。

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気調和機器への補充に限る。

・HFC

期間	生産量	消費量
2019年1月1日～	45,036	64,364
2024年1月1日～	30,024	42,909
2029年1月1日～	15,012	21,455
2034年1月1日～	10,008	14,303
2036年1月1日～	7,506	10,727

・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

※HFC以外はODPトン、HFCは千GWPトン

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⁾	CFC		特定ハロン	
	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
2010 年	0	0	0	0
2011 年	0	—5	0	0
2012 年	0	—5	0	0
2013 年	0	0	0	0
2014 年	0	0	0	0
2015 年	0	0	0	0
2016 年	0	0	0	0
2017 年	0	0	0	0
2018 年	0	0	0	0
2019 年	0	0	0	0
2020 年	0	0	0	0
2021 年	0	0	0	0

(1) CFC 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。

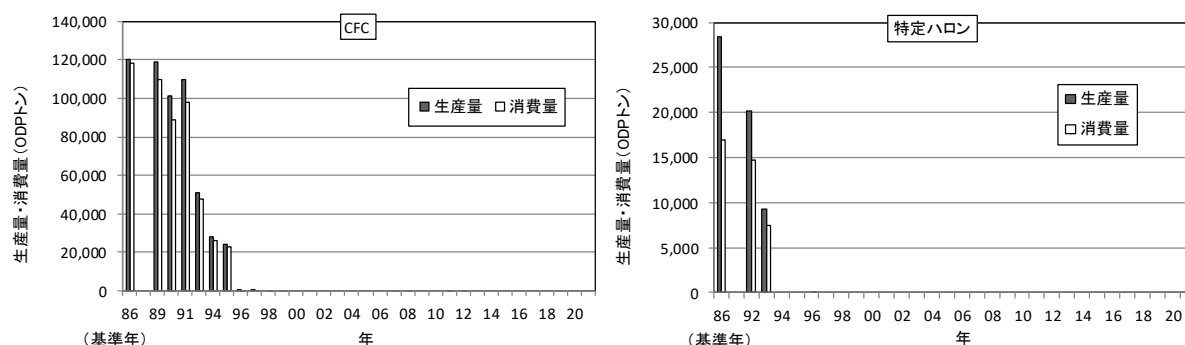


図 4-8 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 A）

（出典）経済産業省発表資料より作成

* 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－輸出货量

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
2010 年	0	0	0	0	0	0
2011 年	0	0	0	0	0	0
2012 年	0	0	0	0	0	0
2013 年	0	0	0	0	0	0
2014 年	0	0	0	0	0	0
2015 年	0	0	0	0	0	0
2016 年	0	0	0	0	0	0
2017 年	0	0	0	0	0	0
2018 年	0	0	0	0	0	0
2019 年	0	0	0	0	0	0
2020 年	0	0	0	0	0	0
2021 年	0	0	0	0	0	0

(1) 各年は 1 月から 12 月までの値となっている。

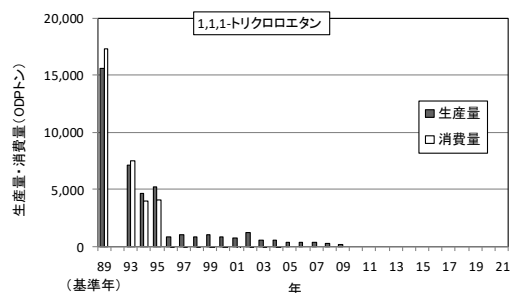
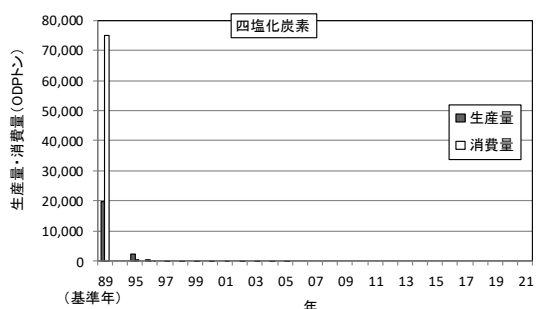
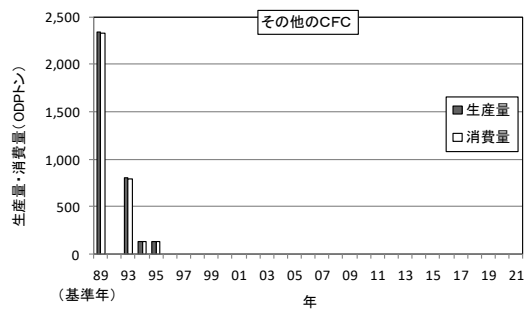


図 4-9 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 B）

（出典）経済産業省発表資料より作成

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
2010 年	400	453	0	0	0	0	138	149
2011 年	397	470	0	0	0	0	128	135
2012 年	297	342	0	0	0	0	83	94
2013 年	294	335	0	0	0	0	1	1
2014 年	252	283	0	0	0	0	0	0
2015 年	213	255	0	0	0	0	0	0
2016 年	168	202	0	0	0	0	0	0
2017 年	151	178	0	0	0	0	0	0
2018 年	129	156	0	0	0	0	0	0
2019 年	164	159	0	0	0	0	0	0
2020 年	0	0	0	0	0	0	0	0
2021 年	0	0	0	0	0	0	0	0

- (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
(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。

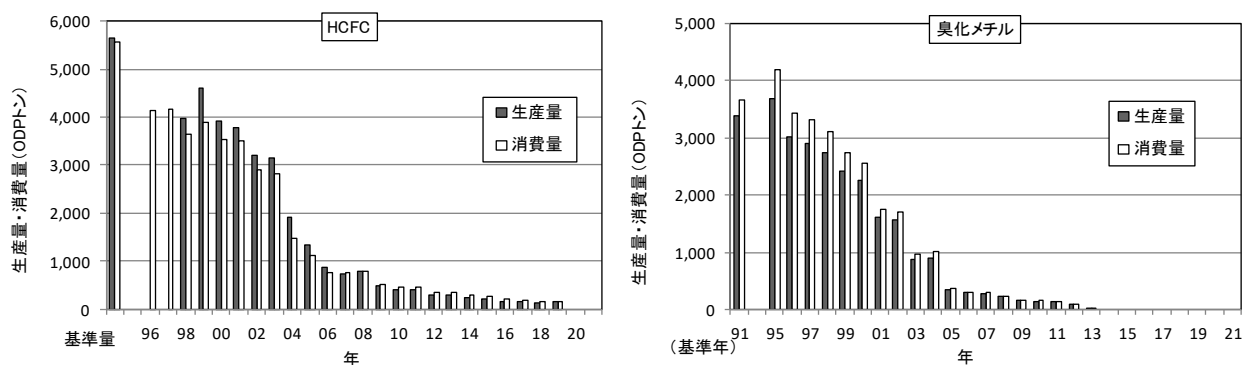


図 4-10 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 C、E）

（出典）経済産業省発表資料より作成

表 4-4 特定物質代替物質の生産量・消費量（議定書附属書 F）

（単位：GWP 千トン）

年次 ⁽¹⁾	HFC		HFC-23	
	生産量	消費量	生産量	消費量
2019 年	2,865	4,688	6,287	651
2020 年	22,503	39,388	5,997	981
2021 年	26,748	33,341	6,415	961

(1) 各年は 1 月から 12 月までの値となっている。

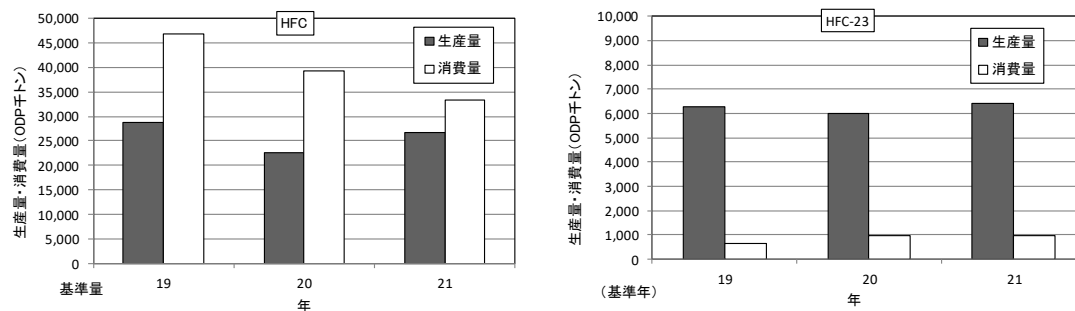


図 4-11 特定物質代替物質の生産量・消費量（議定書附属書 F）

（出典）経済産業省発表資料より作成

(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「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（フロン排出抑制法）」、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 4-5 冷媒フロン類を回収した機器の台数

(単位：千台)

機 器	2011 年度	2012 年度	2013 年度	2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度
業務用 冷凍空調機器	1,230	1,230	1,368	1,394	1,538	1,526	1,522	1,552	1,743	1,511
家庭用 エアコン	2,341	2,359	2,961	2,225	2,355	2,567	2,833	3,398	3,581	3,854
家庭用 冷蔵庫冷凍庫	2,843	2,919	3,433	2,775	2,799	2,829	2,982	3,354	3,597	3,709
カーエアコン	2,375	2,816	2,835	2,904	2,741	2,702	2,972	2,967	2,935	2,779
合 計	8,789	9,324	10,597	9,298	9,433	9,624	10,309	11,269	11,856	11,853

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排出抑制法による回収の合計。

表 4-6 冷媒フロン類の回収量

(単位：トン)

機 器	フロン類 の 種類	2011 年度	2012 年度	2013 年度	2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度
業務用 冷凍空 調機器	CFC	185	211	175	150	165	166	119	131	110	124
	HCFC	2,850	3,140	2,917	2,847	3,169	3,119	2,839	2,772	2,564	2,408
	HFC	922	1,193	1,371	1,427	1,507	1,813	2,137	2,312	2,565	2,702
	計	3,958	4,543	4,463	4,424	4,841	5,097	5,094	5,215	5,239	5,235
家庭用 エアー コン	HCFC	1,215	1,156	1,256	1,069	934	920	940	1,035	951	878
	HFC	262	322	466	508	570	700	892	1,181	1,367	1,584
	計	1,477	1,478	1,722	1,577	1,505	1,622	1,835	2,226	2,346	2,505
家庭用 冷蔵庫 冷凍庫	CFC	112	97	90	72	58	50	44	45	41	36
	HCFC	13	12	13	10	8	7	7	6	6	5
	HFC	160	169	189	166	144	138	132	136	132	120
	計	285	278	291	248	210	195	183	188	172	161
カーエ アコン	CFC	37	21	17	14	10	6	5	4	3	2
	HFC	668	792	792	773	710	682	720	718	694	625
	計	705	813	809	787	720	689	726	722	696	627
特定 フロン	CFC	334	329	282	236	233	222	168	180	153	163
	HCFC	4,078	4,308	4,186	3,926	4,111	4,046	3,786	3,813	3,521	3,291
	小計	4,412	4,637	4,468	4,162	4,334	4,267	3,954	3,993	3,675	3,454
代替 フロン	HFC	2,012	2,476	2,818	2,874	2,931	3,333	3,881	4,347	4,758	5,031
合計		6,424	7,112	7,285	7,036	7,275	7,601	7,835	8,340	8,433	8,485

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排出抑制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末保管量」－「フロン類回収業者による前年度末保管量」

表 4-7 冷媒フロン類の破壊量

(単位：トン)

機 器	フロン類 の 種類	2011 年度	2012 年度	2013 年度	2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度
業務用 冷凍空 調機器 カーエ アコン	CFC	226	218	181	155	190	150	123	116	93	85
	HCFC	2,362	2,393	2,349	2,305	2,464	2,363	2,037	1,786	1,538	1,493
	HFC	1,528	1,829	1,940	2,034	2,161	2,268	2,378	2,457	2,476	2,516
	計	4,116	4,440	4,470	4,494	4,815	4,781	4,538	4,357	4,108	4,099
家庭用 エアコン	HCFC	1,213	1,158	1,245	716	245	239	195	189	121	46
	HFC	262	322	461	325	142	179	183	218	197	185
	計	1,475	1,480	1,706	1,041	388	420	382	413	336	259
家庭用 冷蔵冷 凍庫	CFC	112	97	90	71	56	49	43	44	40	36
	HCFC	13	12	13	10	7	6	6	5	4	3
	HFC	160	169	186	108	40	49	38	34	35	29
	計	285	278	289	189	103	104	87	83	79	69
特定 フロン	CFC	338	315	271	226	246	199	166	160	133	121
	HCFC	3,588	3,563	3,607	3,031	2,716	2,608	2,238	1,980	1,663	1,542
	小計	3,926	3,878	3,878	3,257	2,962	2,807	2,404	2,140	1,796	1,663
代替 フロン	HFC	1,950	2,320	2,587	2,467	2,343	2,496	2,599	2,709	2,708	2,730
合計		5,876	6,199	6,465	5,724	5,305	5,303	5,003	4,849	4,504	4,393

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。

HFC を始めとする代替フロン等 4 ガスの排出量については、1990 年代後半から産業部門を中心に削減が進んできたが、特定フロン使用機器が HFC 使用機器に更新されていること等から冷凍空調機器の冷媒用途を中心に排出量は増加傾向にある。

平成 25 年には、冷凍空調機器の使用中の冷媒フロン類漏えい対策など、

フロン類のライフサイクル全般にわたる抜本的な対策を推進するため、平成 25 年通常国会においてフロン回収・破壊法が改正された。これにより、法律名を「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（フロン排出抑制法）」に改め、フロン回収・破壊法に基づく業務用冷凍空調機器の廃棄時や整備時におけるフロン類の回収及び破壊の徹底に加え、新たに、フロン類及びフロン類使用製品の製造段階における規制、業務用冷凍空調機器の使用段階におけるフロン類の漏えい防止対策等を講じることとされ、平成 27 年度から全面施行された。

これを受けガスメーカー、機器・製品メーカー、機器ユーザー、充填回収業者、破壊業者、再生業者、施工・メンテナンス業者等の様々な主体により、ライフサイクル全体でのフロンの排出抑制の取組が進められている。

さらに、機器廃棄時の冷媒回収率が 4 割程度にとどまっている状況を踏まえ、機器ユーザーの廃棄時のフロン類引渡義務違反に対して、直接罰を導入するなど、関係事業者の相互連携により機器ユーザーの義務違反によるフロン類の未回収を防止し、機器廃棄時にフロン類の回収作業が確実に行われる仕組みを構築するためのフロン排出抑制法の改正を令和元年に実施、令和 2 年 4 月 1 日に施行された。

また、2021 年 10 月に閣議決定した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」では、代替フロン分野におけるカーボンニュートラルに向けた対策として、モントリオール議定書キガリ改正の着実な履行、グリーン冷媒使用機器普及拡大、機器使用時の漏えいゼロを目指したフロン類の漏えい防止、機器廃棄時の未回収冷媒ゼロを目指した冷凍空調機器からのフロン類の回収・適正処理の方向性を示した。さらに、「地球温暖化対策計画」（令和 3 年 10 月閣議決定）では、代替フロン等 4 ガスにつき、2030 年度において、2013 年度比 44% 減の水準（約 21.8 百万 t-CO₂）にするという目標を設定し、それに向けた具体的な取組を示している。

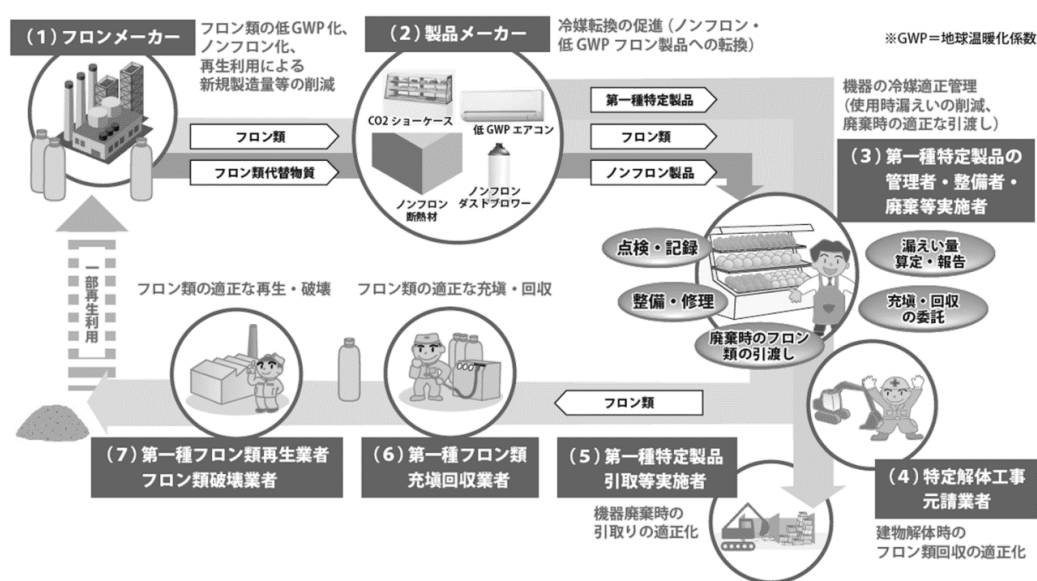


図 4-12 フロン排出抑制法の概要

(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。

- ・ 平成 18 年 5 月には、環境省は 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、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、「ハロン破壊処理ガイドライン」をとりまとめた。

表 4-8 ハロン使用機器の設置状況 (2021 年(令和 3 年)12 月 31 日現在)

ハロン種類	設備名	設置件数	ハロン量 (t)
ハロン-1301	消火設備	29,872	15,876
	消火装置	8,184	642
	消火器	6,480	112
	小計	44,536	16,630
ハロン-2402	消火設備	256	134
	消火装置	56	8
	消火器	99	3
	小計	411	145
ハロン-1211	消火設備	25	8
	消火装置	6	0
	消火器	511	31
	小計	542	39
合計		45,489	16,814

(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 (令和 3 年度)

表 4-9 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(トン)	回収量(トン)
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
2010	58	161
2011	46	159
2012	41	196
2013	91	217
2014	173	179
2015	192	166
2016	187	172
2017	164	236
2018	173	191
2019	170	160
2020	187	172

(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 (令和 2 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 4-10 令和 2 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*		届出外	排出量	(参考)排出量	(参考)排出量	届出
		大気	公共用水域	排出量**	合計	(ODP トン)***	(万 CO ₂ トン)****	移動量*****
CFC	CFC-11	288	2,849	0	748,887	751.736	751.7	357.1
	CFC-12	161	3,579	0	428,060	431,639	431.6	470.5
	CFC-113	284	600	0	600	1,200	1.0	0.7
	CFC-114	163	-	-	0	0	0.0	0.0
	CFC-115	126	-	-	0	0	0.0	0.0
	CFC-13	107	-	-	0	0	0.0	0.0
	CFC-112	263	-	-	0	0	0.0	0.0
	合計		7,028	0	1,177,547	1,184,575	1,184	828
ハロン	ハロン 1211	380	-	-	0	0	0.0	0.0
	ハロン 1301	382	2,070	0	8,668	10,738	107.4	7.7
	ハロン 2402	211	-	-	0	0	0.0	0.0
	合計		2,070	0	8,668	10,738	107	8
HCFC	HCFC-21	177	8,110	0	8,110	16,220	0.6	0.0
	HCFC-22	104	123,225	0	1,662,225	1,785,450	98.2	323.2
	HCFC-123	164	17,929	0	86,837	104,766	2.1	0.8
	HCFC-124	105	1,400	0	1,400	2,800	0.1	0.2
	HCFC-133	106	11,000	0	11,000	22,000	1.3	0.0
	HCFC-141b	176	3,983	0	779,100	783,083	86.1	56.8
	HCFC-142b	103	7,862	0	294,572	302,434	19.7	69.9
	HCFC-225	185	123,184	0	132,655	255,839	17.9	9.2
	合計		296,692	0	2,975,899	3,272,591	226	460
四塩化炭素		149	1,655	281	1,945	3,882	4.3	0.5
1,1,1-トリクロロエタン		279	480	17,760	18,240	36,480	3.6	0.5
臭化メチル		386	109,830	0	490,800	600,630	360.4	0.3
合計			417,755	18,041	4,673,099	5,108,896	1,886	1,297

* 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

** 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

*** ODS 排出量はモントリオール議定書の値を採用

**** CO₂ 排出量は第 4 次 IPCC 報告書（100 年 GWP 値）を採用

***** 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

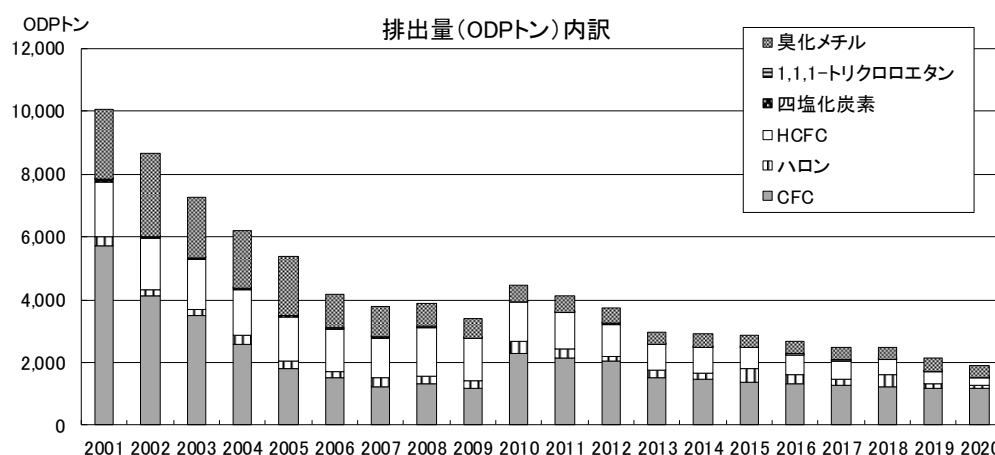


図 4-13 PRTR に基づくオゾン層破壊物質の排出量 (ODP 換算)

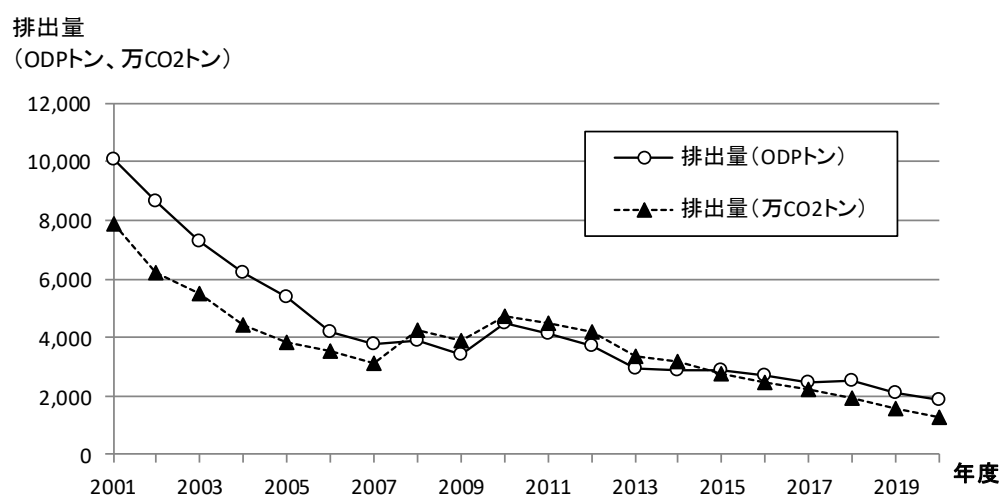


図 4-14 PRTR に基づくオゾン層破壊物質の排出量 (ODP 換算、CO₂ 換算)

(5) 代替フロン等 4 ガスの排出抑制の目標

「地球温暖化対策計画」(平成 28 年 5 月 13 日閣議決定)においては、代替フロン等 4 ガス(HFCs、PFCs、SF₆、NF₃)については、2030 年において、2013 年比 25.1%減(2005 年比 4.5%増)の水準(約 2,890 万トン-CO₂)にすることを目標としている。

表 4-11 代替フロン等 4 ガスの排出量の目標

(単位：百万トン-CO₂換算)

	2005 年 実績	2013 年 実績	2030 年の 排出量の目標
代替フロン等 4 ガス	27.7	38.6	28.9
HFCs	12.7	31.8	21.6
PFCs	8.6	3.3	4.2
SF ₆	5.1	2.2	2.7
NF ₃	1.2	1.4	0.5

(出典)「地球温暖化対策計画」平成 28 年 5 月 13 日閣議決定

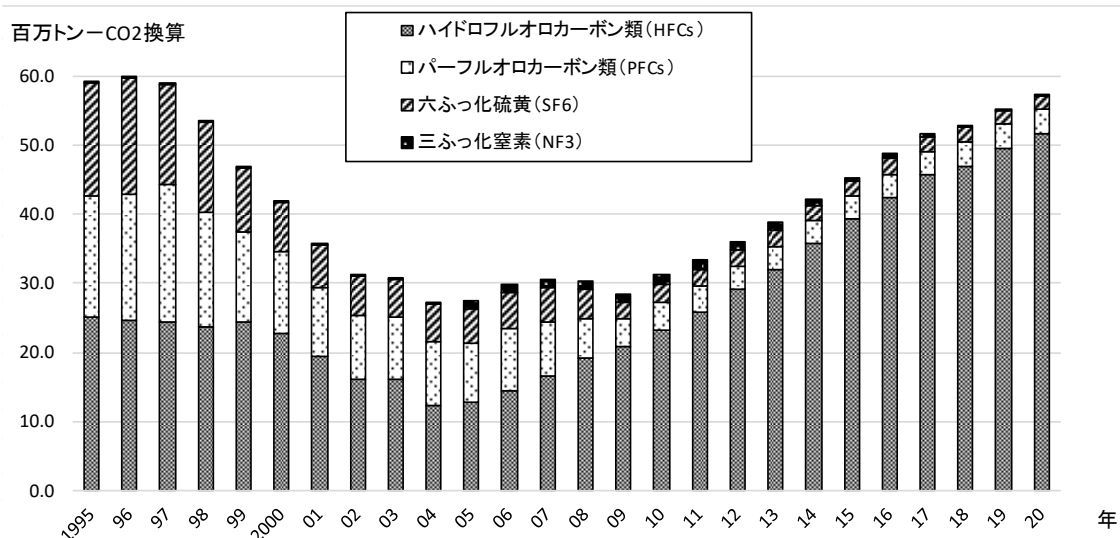


図 4-15 代替フロン等 4 ガスの排出量の推移(ガス別)

(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の推進等に関する法律(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 4-12 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）（令和 4 年 2 月現在）

ダストブロワー	【判断の基準】 ●フロン類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。 （備考） ・ダストブロワーに係る判断の基準における「フロン類」とは、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 1 項に定める物質をいう。判断の基準において使用できる物質は、二酸化炭素、ジメチルエーテル及びハイドロフルオロオレフィン（HFO1234ze）等。 ・ダストブロワーに係る判断の基準については、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 2 項の指定製品の対象となる製品に適用するものとする。
電気冷蔵庫、 電気冷凍庫、 電気冷凍冷蔵庫	【判断の基準】 ●冷媒及び断熱材発泡剤にフロン類が使用されていないこと。 （備考） ・「フロン類」とは、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 1 項に定める物質をいう。
エアコンディ ションナー	【判断の基準】 ●冷媒に使用される物質の地球温暖化係数は 750 以下であること。 【配慮事項】 ●冷媒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。 （備考） ・判断の基準については、経済産業省関係フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律施行規則（平成 27 年経済産業省令第 29 号）第 3 条に規定する家庭用エアコンディショナー及び店舗・事務所用エアコンディショナーのうち、平成 27 年経済産業省告示第 50 号（エアコンディショナーの製造業者等の判断の基準となるべき事項）により目標値及び目標年度が定められる製品に適用するものとする。 ・「地球温暖化係数」とは、地球の温暖化をもたらす程度の二酸化炭素に係る当該程度に対する比を示す数値をいう。
ガスヒートポン プ式冷暖房機	【判断の基準】 ●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。 【配慮事項】 ●冷媒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。 （備考） ・「地球温暖化係数」とは、地球の温暖化をもたらす程度の二酸化炭素に係る当該程度に対する比を示す数値をいう。
ヒートポンプ式 電気給湯器	【判断の基準】 ●冷媒にフロン類が使用されていないこと。 【配慮事項】 ●冷媒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 （備考） ・「フロン類」とは、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 1 項に定める物質をいう。 ・「地球温暖化係数」とは、地球の温暖化をもたらす程度の二酸化炭素に係る当該程度に対する比を示す数値をいう。 ・判断の基準は、業務用ヒートポンプ式電気給湯器については適用しないものとする。ただし、冷媒にオゾン層を破壊する物質は使用されていないこととする。

表 4-12 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）（令和 4 年 2 月現在）（続き）

自動車	【判断の基準】 ①乗用車にあつては、基準値 1 はアを、基準値 2 はイを満たすこと。ただし、内燃機関を有する自動車（ガソリン、軽油及び LP ガスを燃料とする車両に限る。）の場合は、併せて表 1 に示された区分の排出ガス基準（ガソリン又は LP ガスを燃料とする車両に限る。）に適合し、かつ、表 2 に示された区分ごとの燃費基準値を満たすこと。 ア．電動車等であること。 イ．次世代自動車であること。 ②小型バスにあつては、基準値 1 はアを、基準値 2 はイを満たすこと。併せて、ガソリンを燃料とする自動車の場合は、表 1 に示された区分の排出ガス基準に適合すること。 ア．次世代自動車であること。 イ．次世代自動車であること又は表 3 に示された区分の燃費基準値を満たすこと。 ③小型貨物車にあつては、基準値 1 はアを、基準値 2 はイを満たすこと。併せて、ガソリン又は LP ガスを燃料とする自動車の場合は、表 1 に示された区分の排出ガス基準に適合すること。 ア．次世代自動車であること。 イ．次世代自動車であること又は利用する燃料に対応した表 4－1、表 4－2 及び表 4－3 に示された区分の燃費基準値を満たすこと。 ④バス等にあつては、基準値 1 はアを、基準値 2 はイを満たすこと。 ア．次世代自動車であること。 イ．次世代自動車であること又は表 5 に示された区分の燃費基準値を満たすこと。 ⑤トラック等にあつては、基準値 1 はアを、基準値 2 はイを満たすこと。 ア．次世代自動車であること。 イ．次世代自動車であること又は表 6 に示された区分の燃費基準値を満たすこと。 ⑥トラクタにあつては、基準値 1 はアを、基準値 2 はイを満たすこと。 ア．次世代自動車であること。 イ．次世代自動車であること又は表 7 に示された区分の燃費基準値を満たすこと。 【配慮事項】 ●エアコンディショナーの冷媒に使用される物質の地球温暖化係数は 150 以下であること。（備考） ・配慮事項については、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 2 項の指定製品の対象となる製品に適用するものとする。 ・「地球温暖化係数」とは、地球の温暖化をもたらす程度の二酸化炭素に係る当該程度に対する比を示す数値をいう。
マットレス	【判断の基準】 ●ウレタンフォームの発泡剤にフロン類が使用されていないこと。（備考） ・「フロン類」とは、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 1 項に定める物質をいう。
断熱材	【判断の基準】 ●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つて、次の要件を満たすものとする。 ・フロン類が使用されていないこと。（備考） ・「フロン類」とは、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 1 項に定める物質をいう。
氷蓄熱式 空調機器	【判断の基準】 ●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	【判断の基準】 ●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。

表 4-12 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）（令和 4 年 2 月現在）（続き）

庁舎管理	【配慮事項】
------	--------

	● 庁舎管理に空気調和設備、熱源設備の維持管理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のための適切な措置が講じられていること。 (備考) ・「フロン類」とは、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 1 項に定める物質をいう。
加煙試験	【判断の基準】 ● 加煙試験器の発煙体にフロン類が使用されていないこと。 (備考) ・「フロン類」とは、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 1 項に定める物質をいう。
飲料自動販売機設置	【判断の基準】 ● 冷媒及び断熱材発泡剤にフロン類が使用されていないこと。 【配慮事項】 ● 年間消費電力量及びエネルギー消費効率基準達成率並びに冷媒（種類、地球温暖化係数及び封入量）が自動販売機本体の見やすい箇所に表示されるとともに、ウェブサイトにおいて公表されていること。 (備考) ・「フロン類」とは、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律（平成 13 年法律第 64 号）第 2 条第 1 項に定める物質をいう。判断の基準において使用できる冷媒は二酸化炭素、炭化水素及びハイドロフルオロオレフィン（HFO1234yf）等。 ・「地球温暖化係数」とは、地球の温暖化をもたらす程度の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。

※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 令和 4 年 2 月」を参照。

②省エネ型自然冷媒機器の導入補助

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等装置は、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の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。

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。

(7) 開発途上国への支援

モントリオール議定書の各締約国は、同議定書で規定された削減スケジュールに従って、オゾン層破壊物質である CFC（クロロフルオロカーボン）、HCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）等の削減対策を行っている。2019 年 1 月 1 日から発効しているキガリ改正により HFC の削減にも各国は取り組んでいる。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、我が国はフロン類のライフサイクル全般にわたる排出抑制対策を国際的に展開するための枠組みであるフルオロカーボン・イニシアティブ（フルオロカーボンのライフサイクルマネジメントに関するイニシアティブ、IFL）等を通じ、フロン類の回収・破壊等についての技術協力や知見・経験の提供を行っている。

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。

表 4-12 のモントリオール議定書多数国間基金への拠出金は 1 期 3 年間であり、第 11 期（2021～2023 年）の拠出額は、新型コロナウイルスの影響により対面形式での会合が延期されたことから、2022 年 7 月に 3 年ぶりに対面開催された第 5 回特別締約国会合で拠出額が確定した。

表 4-13 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
第 8 期 2012～2014 年	45,000 万ドル	6,394 万ドル
第 9 期 2015～2017 年	50,750 万ドル	6,568 万ドル
第 10 期 2018～2020 年	54,000 万ドル	7,319 万ドル
第 11 期 2021～2023 年	54,000 万ドル	6,676 万ドル

表 4-14 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	2006～2009 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	2010～2011 年	67,800 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)	2011～2018 年	130,000 146,900 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。
中国	HCFC 削減管理計画 第 1 ステージ（冷蔵サービス分野における HCFC 削減）	2011～2017 年	400,000 452,200 ドル (多数国間基金)	中国における HCFC 削減管理計画のうち冷蔵サービス分野における HCFC 削減
中国	HCFC 削減管理計画 第 2 ステージ（冷蔵サービス分野における HCFC 削減）	2016 年～ 実施中	400,000 452,200 ドル (多数国間基金)	中国における HCFC 削減管理計画のうち冷蔵サービス分野における HCFC 削減
モンゴル	HCFC 削減管理計画 第 2 ステージ（冷蔵サービス分野における HCFC 削減）	2020 年～ 実施中	170,000 192,100 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冷蔵サービス分野における HCFC 削減

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（詳細は第1部3-1(b) (P19) 脚注を参照）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4-16である。1992年のコペンハーゲン改正以降、EESCの長期的な減少が期待されている。*

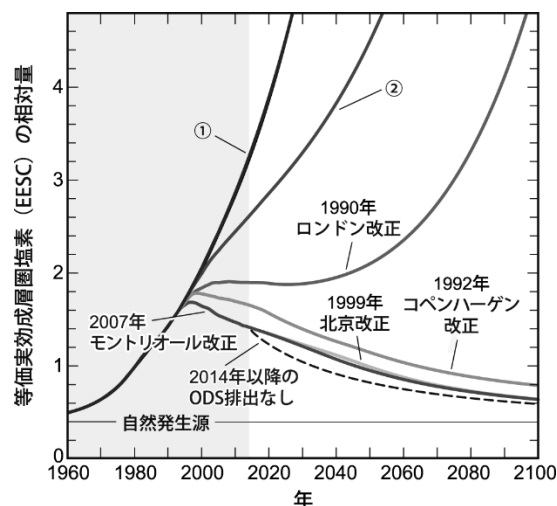


図4-16 モントリオール議定書のEESCの削減効果

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) Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2014 Update
Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014 (WMO, 2015) より作成

* 現時点で考えられるODSの放出はモントリオール議定書の枠組み内で認められている途上国でのODSの生産・使用に伴う放出ならびにバンクと呼ばれる市中に存在するODS類(例: 冷蔵設備で今なお用いられているCFC、消火設備内に存在するハロン)の放出である。仮に2014年時点でこれらの潜在的なODSの放出を完全になくした場合の今後のEESCの推移は図4-14の破線で示す通りである。2007年のモントリオール改正に従った場合に期待されるEESCの推移はこの破線で示した推移とは明らかに異なっており、今後数十年はある程度のODS放出が見込まれることを意味する。なお、2014年以降のODS放出を完全になくすことにより、EESCが1980年レベルに戻る時期を13年早めることが期待できる。(Q&A: WMO, 2015)

モントリオール議定書による取組みにより EESC の増加を食い止め、着実な減少へと導いたことは、深刻なオゾン層破壊の回避に繋がった。図 4-17 は化学気候モデルによって計算された、ODS に対する規制を行わなかった場合に予想される年平均のオゾン全量ならびにその緯度分布の変化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（図 4-17 中の破線）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 4-16 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 $220\text{ m atm}\cdot\text{cm}$ を下回り、2040 年には、北極域並びに低緯度域でも年平均のオゾン全量が $220\text{ m atm}\cdot\text{cm}$ 程度になることが予測されている。さらに 2052 年の段階では、中緯度域に見られるオゾン全量の大きな緯度勾配の特徴は消失し、また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 $220\text{ m atm}\cdot\text{cm}$ 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。また、北半球中高緯度および南半球中高緯度のオゾン全量分布の経年変化を図 4-18 に示す。南半球では、ほぼ南極を中心に $220\text{ m atm}\cdot\text{cm}$ 以下の領域（黒の斜線の部分）が拡大してゆくのにに対し、北半球ではグリーンランド、スカンジナビア半島とその少し東側の経度で先に拡大する傾向があることがわかる。

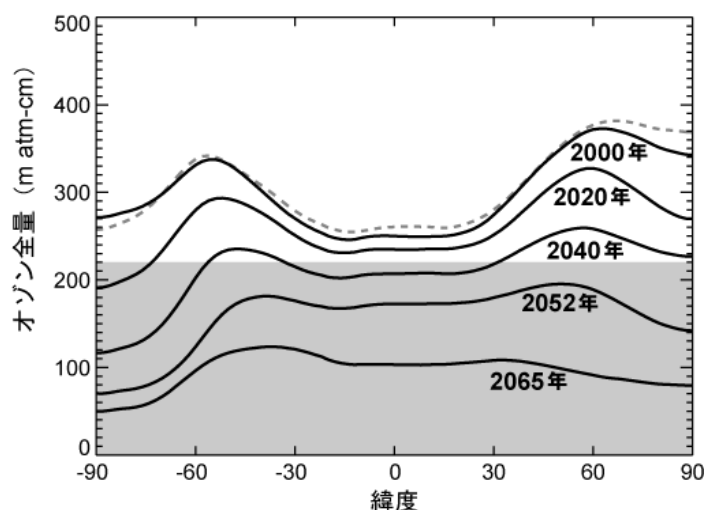


図 4-17 モントリオール議定書によるオゾン層の保護効果

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。破線は、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 $220\text{ m atm}\cdot\text{cm}$ 以下の部分。

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

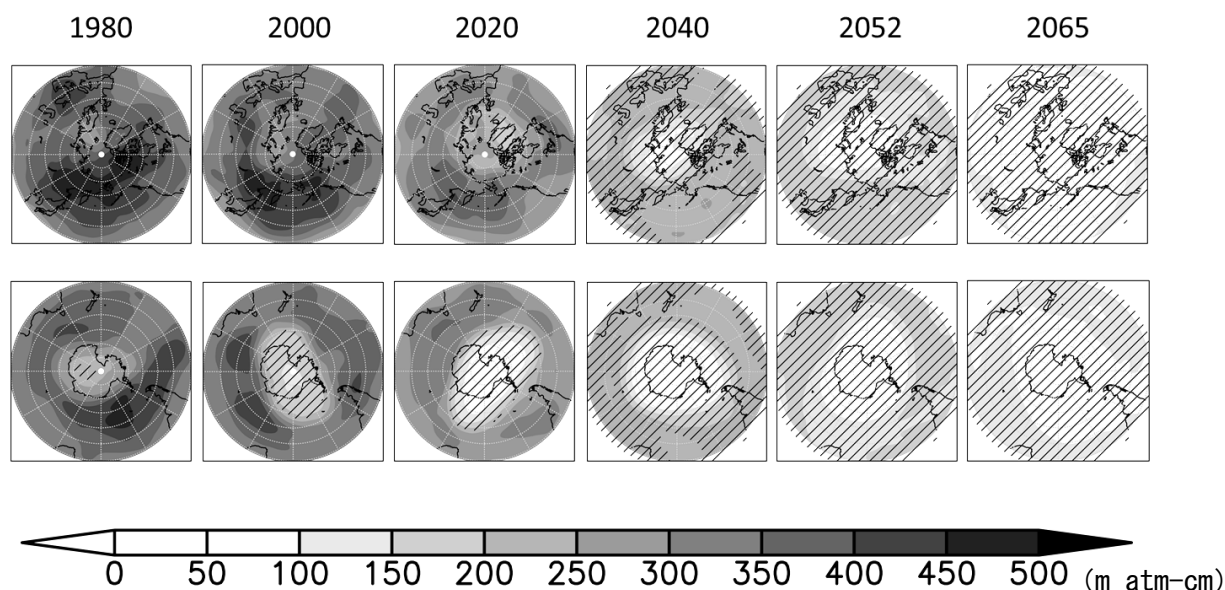


図 4-18 北半球中高緯度（上）および南半球中高緯度（下）のオゾン全量分布の経年変化

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値の分布を濃淡で表す。北緯 45 度～90 度の 1 月～4 月および南緯 45 度～90 度の 9 月～11 月の領域と期間で、それぞれオゾン全量が最低値を示した日の分布を示す。濃淡のスケールの数字の単位は m atm-cm 。オゾン全量が 220 m atm-cm 以下を示す領域を黒の斜線で示す。（出典）国立環境研究所秋吉英治氏提供データ

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 4-17 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 4-19 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、2060 年には北半球中緯度帯の夏季の UV インデックスは現在の 2.5 倍に達すると予測されている。

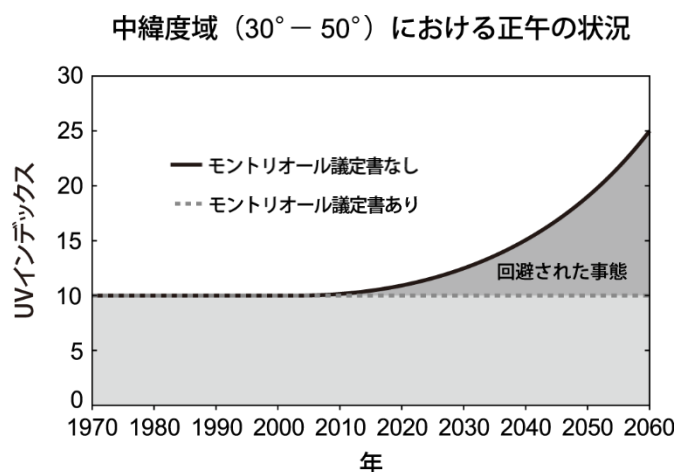


図 4-19 北半球中緯度帯の UV インデックスの予測（仮定）

実線は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。破線はモントリオール議定書によりオゾン層破壊物質が規制される場合の予測。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) 及び Environmental Effects of Ozone Depletion and Its Interactions with Climate Change: 2014 Assessment (UNEP-EEAP, 2015) をもとに作成

(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 4-20 は地球温暖化係数で重み付けした放出量を示している。モントリオール議定書が締結された 1987 年時点の温室効果ガスとしての ODS の放出量は、二酸化炭素の量に換算すると約 9.3 億トンに相当し、当時の二酸化炭素放出量（約 21 億トン）のほぼ半分の量に相当していた。一方、図中の網掛け部分は、モントリオール議定書の実施により、温室効果ガスとして新たに放出されることを避けることが出来た ODS の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。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。

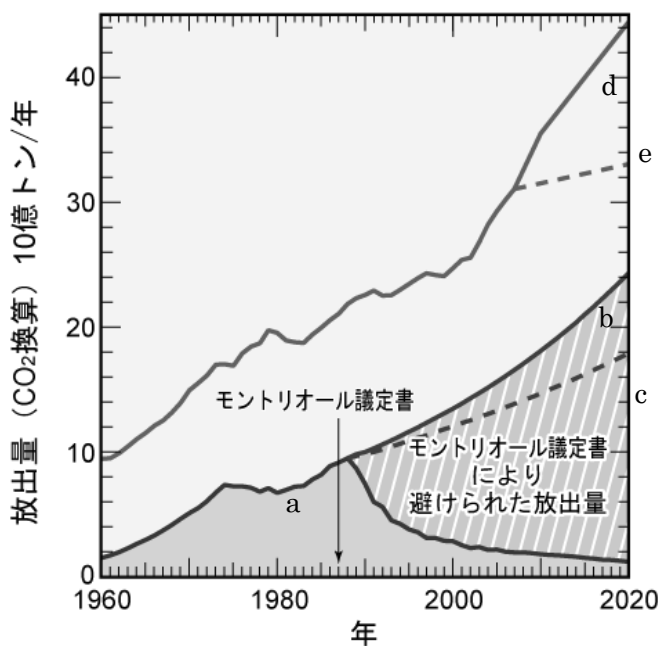


図 4-20 地球温暖化係数で重み付けした放出量（CO₂換算）

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を表す。破線 e は SRES シナリオのうち、最小の二酸化炭素放出量を表す。

（出典）Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2014 Update
Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014 (WMO, 2015) 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 4-21 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。

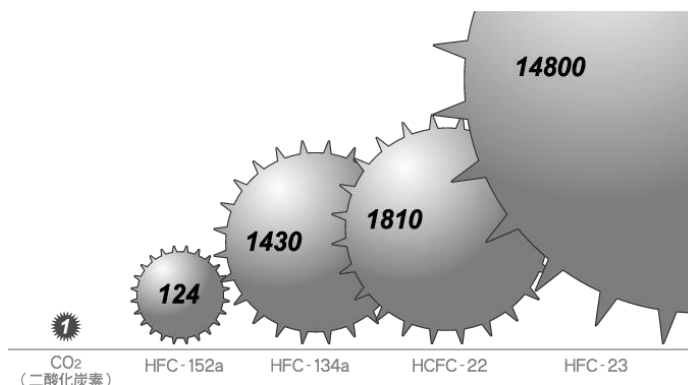


図 4-21 HFC の地球温暖化係数

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。

(出典) IPCC 第 4 次評価報告書 (2007) より作成

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 4-22)。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 の 50%を超えるようになり、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。

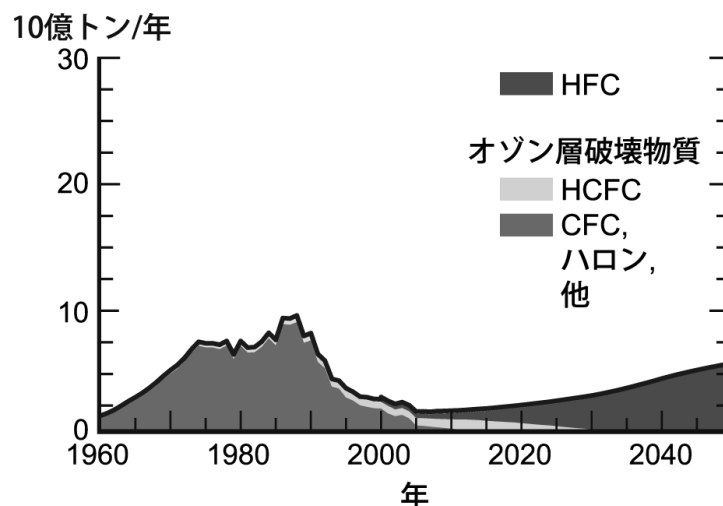


図 4-22 地球温暖化係数で重み付けした HFC の放出量予測

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。

(出典) Twenty Questions and Answers About the Ozone Layer: 2014 Update

Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014 (WMO, 2015) より作成

2. WMO/UNEP 科学評価パネル報告書要旨(2018 年)*

オゾン層破壊の科学アセスメント：2018 Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018

総括要旨 Executive Summary

オゾン層破壊の科学アセスメントは、その原稿作成と査読に貢献した世界中の多くの科学者たちの見解を反映させることによりオゾン層破壊に関する科学的な理解の進展をまとめたものであり、モントリオール議定書締約国による意思決定のための科学的な基盤を追加するものである。このアセスメントは、期間を延ばした観測データ、新しい化学気候モデルシミュレーション及び新しい解析結果に基づいている。

モントリオール議定書の下に実施された施策により、大気中のオゾン層破壊物質の量が減少し、成層圏オゾンの回復が始まっている。

- ・モントリオール議定書により規制された長寿命のオゾン層破壊物質に起因する対流圏の塩素と臭素の量はともに、前回のアセスメント（2014 年）以降も減少を続けている（図 1(a)）。今回得られた重要な根拠から、オゾン層破壊物質の減少が、以下のようなオゾン変化傾向に大きく影響していることが示唆される。
- ・南極オゾンホールは、毎年発生しているが、回復傾向にある。モントリオール議定書による規制の結果、極域において近年発生しているものを大きく上回る顕著なオゾン層破壊はみられなくなった。
- ・極域外側（中緯度と熱帯）の上部成層圏オゾンは、2000 年以降、10 年あたり 1～3% 増加している（図 2）。
- ・1997～2016 年の全球（南緯 60 度～北緯 60 度）のオゾン全量には、有意な変化傾向は確認できず、前回のアセスメント以降もオゾン全量の平均は、1964～1980 年（顕著なオゾン層破壊が起こる前の期間）よりおよそ 2%少ない状態を保っている
- ・今世紀後半のオゾン層の変化予測は、地域によって増加あるいは減少というように複雑になっている。オゾン全量が 1980 年（オゾン層破壊が顕著になる前の指標となる年）の量に回復するのは、北半球中緯度では 2030 年代、南半球中緯度では今世紀半ば頃と予測さ

*環境省「WMO/UNEP オゾン層破壊の科学アセスメント：2018」総括要旨の概要（仮訳）より引用

れる。南極オゾンホールは、次第に縮小し、(南極オゾンホールが発生する)春のオゾン全量が1980年の量に回復するのは2060年代と予測される(図1(d))。

(モントリオール議定書の)キガリ改正により、ハイドロフルオロカーボン類(HFCs)を要因とする2100年における全球平均地上気温の上昇を(規制無しの場合の)0.3~0.5℃から0.1℃以下に抑制すると予測される(図3)。

- ・キガリ改正の規定による気温上昇抑制の大きさ(0.2~0.4℃)は、今世紀における全球平均地上気温の上昇を産業革命以前に比べて2℃以下に抑えることを目的とした2015年のパリ協定において大きな意味合いを持つ。

CFC-11の全球での排出量が予期せず増加している(図4)。

- ・2つの独立したネットワークによる観測からの推定によれば、全球のCFC-11排出量は2012年以降増加しており、前回アセスメント(2014年)で報告された大気中濃度の安定した減少は鈍化している。2014~2016年の全球の濃度減少率は、2002~2012年に比べ2/3にとどまっている。東アジアからのCFC-11の排出量は、2012年以降増加しているが、全球の排出量の増加にどれだけ寄与しているかはよくわかっていない。どの国(々)で排出量が増加しているかも特定されていない。

四塩化炭素の主要な排出源は、以前は認識されていなかったが、定量的に特定されている。

- ・四塩化炭素の発生源には、クロロメタン類やテトラクロロエチレンの生産過程の意図しない副産物としての排出や、塩素アルカリ過程の一過性の排出が含まれる。四塩化炭素の全球の収支は、前回アセスメント(2014年)以上によく理解されており、以前確認されていた、観測から推測される排出量と産業統計から見積もられる排出量の差は大きく減少している。

成層圏オゾンの保護のため、モントリオール議定書を継続して成功させるためには、議定書を継続して遵守することが不可欠である。

- ・オゾン層の回復を早めるために可能な施策は限られているが、それは効果的な行動が既に実施されているためである。残されている施策として、四塩化炭素やジクロロメタンなど規制済及び未規制の物質の排出を完全になくすこと、未破壊のCFCs、ハロン及びHCFCsを回収して破壊すること、HCFCsと臭化メチルの生成を廃止することがあり、それぞれオゾン回復に一定の効果をもたらす。二酸化炭素、メタン及び一酸化二窒素の将来の排出は、気候と大気化学過程への影響を通して、将来のオゾン層にとって極めて重大な意味合いを持つ。一酸化二窒素の排出の緩和によっても、オゾン回復に一定の効果をもたらす。

オゾン層破壊物質とオゾン全量の時系列

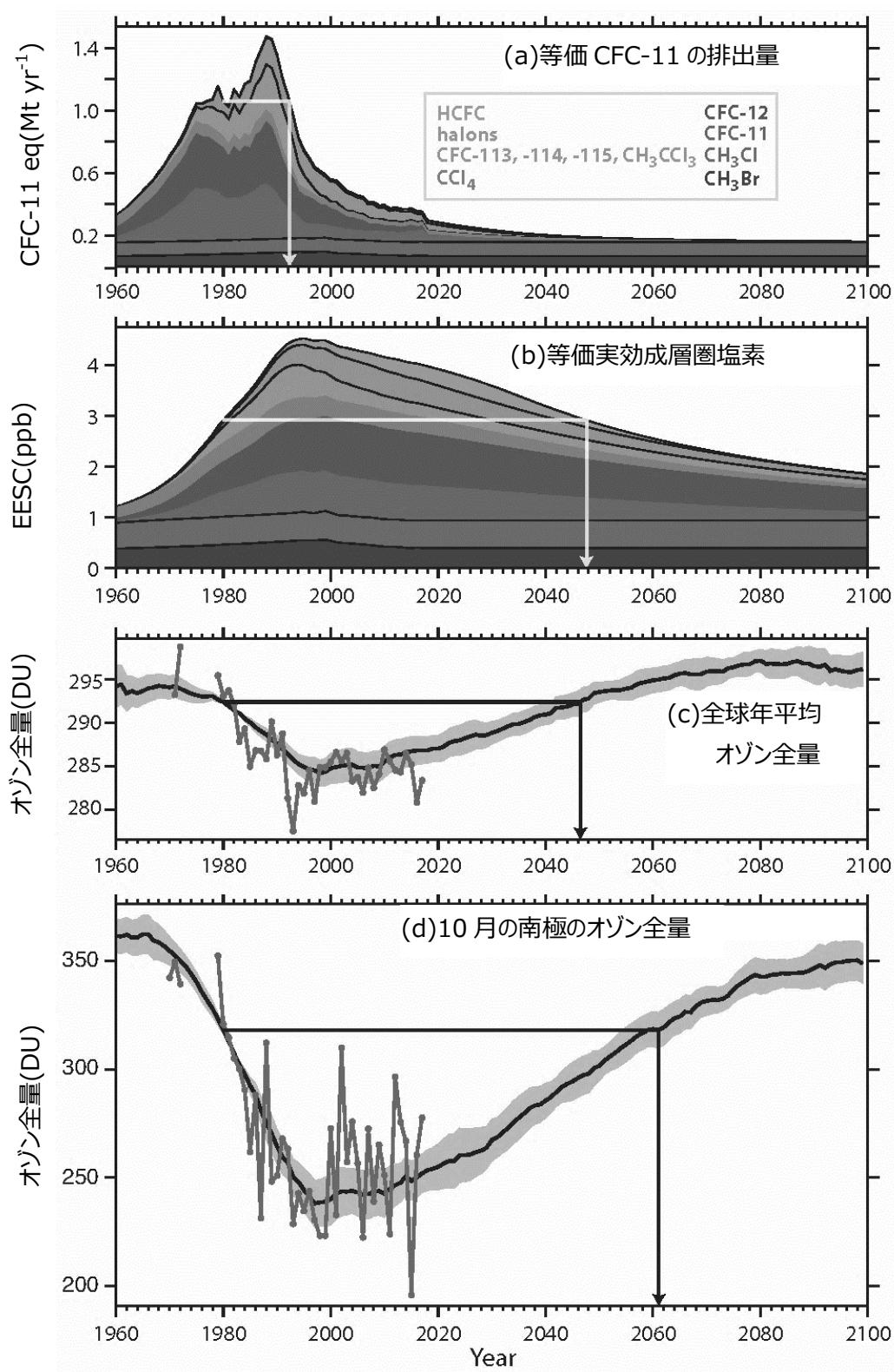
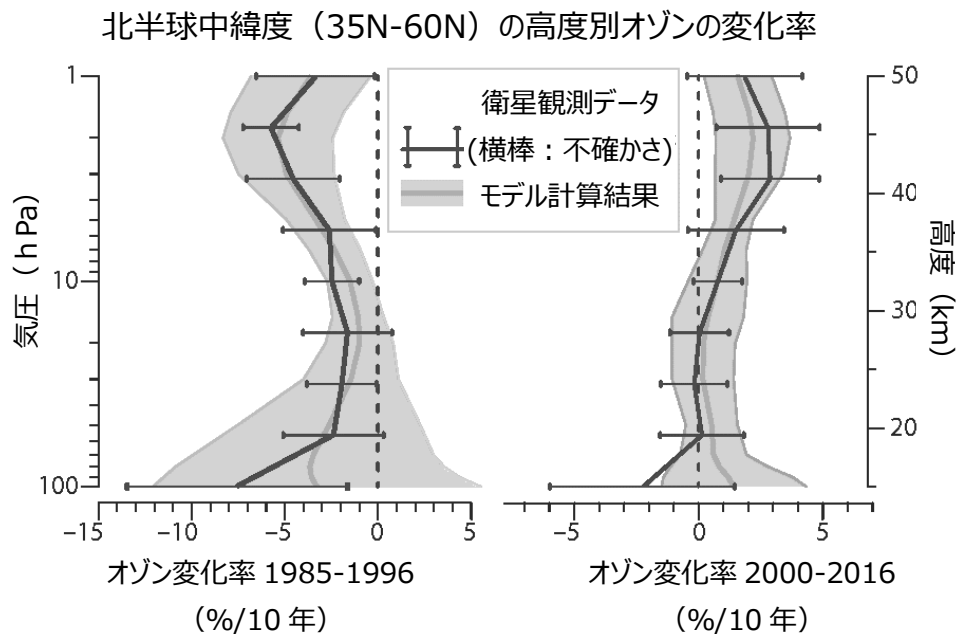


図1 オゾン層破壊物質とオゾン全量の時系列

- (a) 等価 CFC-11 の排出量 (各物質のオゾン層破壊効果を CFC-11 に換算した排出量)
 (b) 等価実効成層圏塩素の濃度 (成層圏に達したオゾン層破壊物質 (塩素と臭素) の濃度)
 (c) 全球の年平均オゾン全量 (d) 10 月 (春季) の南極のオゾン全量



(左図：1985～1996 年の 10 年あたりの変化率、右図：2000～2016 年の 10 年あたりの変化率)

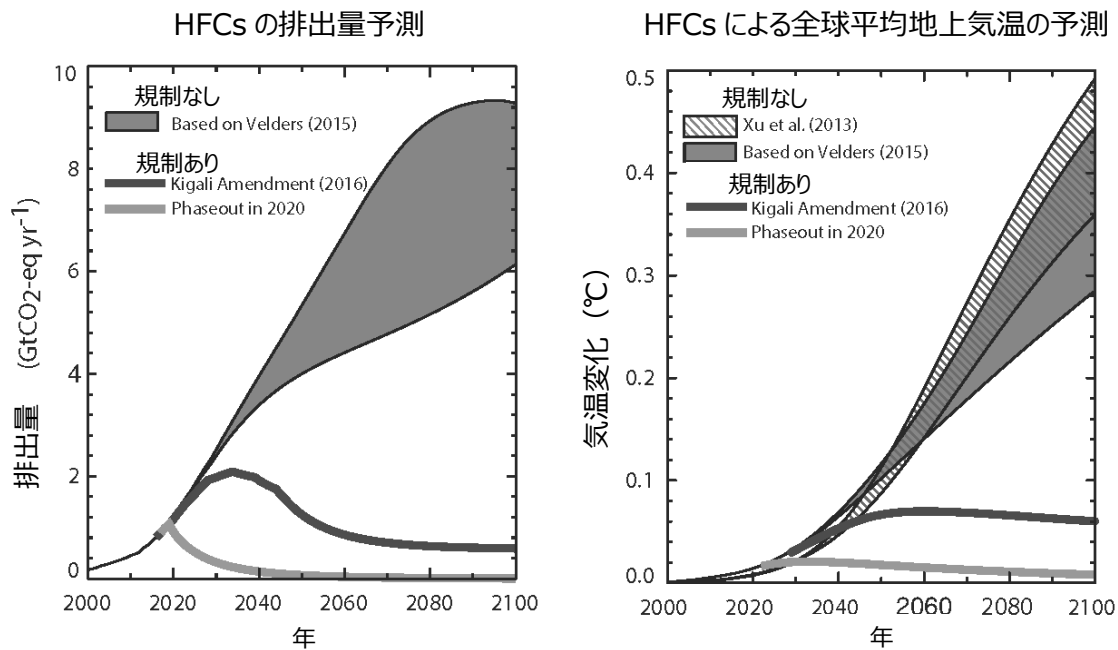


図3 HFCs 排出量シナリオによる全球平均地上気温の予測

(左図：HFCs の排出量シナリオ、右図：全球平均地上気温の予測)

灰色領域：モントリオール議定書のキガリ改正によるHFCs の規制が行われないシナリオ

濃い灰色線：同規制が達成できたときのシナリオ

薄い灰色線：キガリ改正以上の規制（2020 年に HFCs 生産全廃）が行われた場合のシナリオ

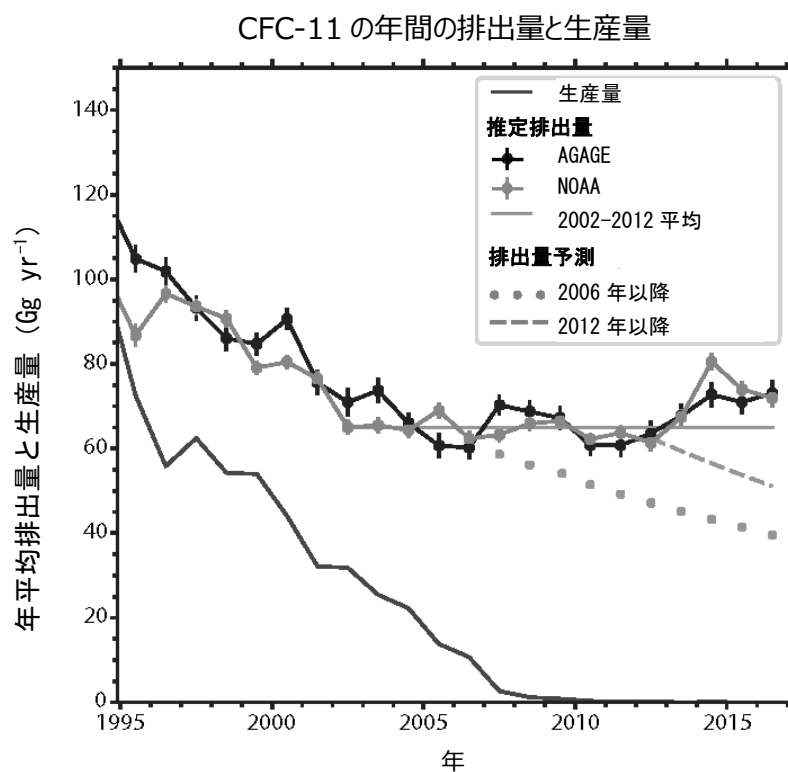


図 4 CFC-11 の年間の排出量と生産量

2013 年以降、観測から推定される排出量は、予測された排出量や過去 10 年平均の排出量よりも大きくなっている。

3. UNEP 環境影響評価パネル報告書要旨(2018 年)*

オゾン層破壊と気候変化との相互作用による環境影響：2018 アセスメント
Environmental Effects and Interactions of Stratospheric Ozone Depletion,
UV Radiation, and Climate Change: 2018 Assessment Report

総括要旨

Executive Summary

※語句・用語の統一など：「ばく露」（＝「曝露」だが左記で統一。×暴露、×曝露）

「気候変化」（長期的な傾向を示す場合。短期的な変動や、条約等における正式名称で使う場合は「気候変動」もあり得る（例：『気候変動に関する国際連合枠組条約』等）。

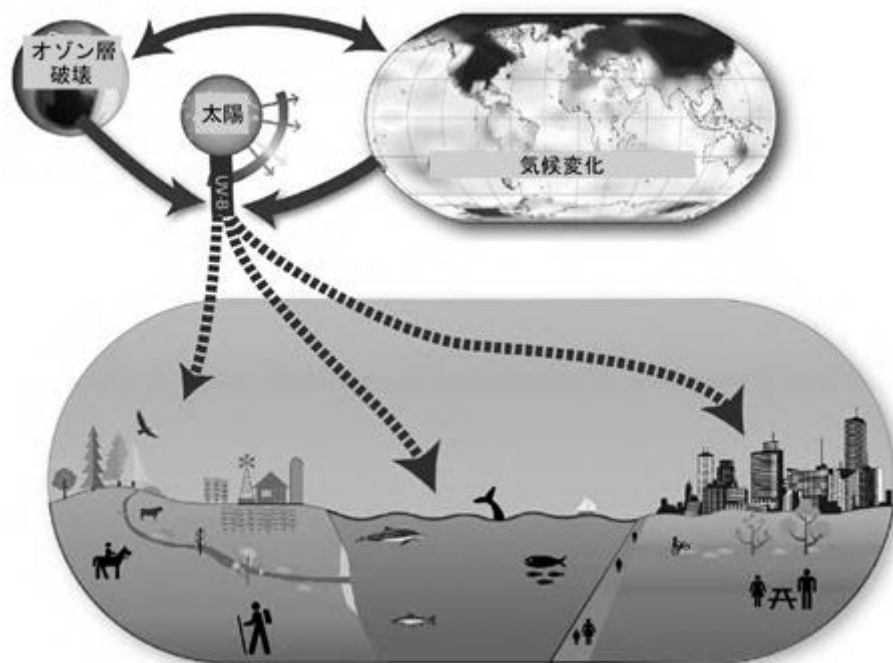


図1 成層圏オゾンの減少、気候変化、および環境と人の健康への影響の関連

成層圏オゾン層破壊、モントリオール議定書、および環境影響評価パネル

34 年前、南極大陸上空でこれまでにないほどオゾン層が薄くなっていることが報告された。オゾン層が薄くなることで、UV-B（波長 280-315nm の紫外線）へのばく露の増加リスクが起これ、人の健康と地球環境に大きな損害をもたらすかもしれないという懸念が生じた。これを受けて国際社会は、この地球大気の劇的な変化の原因を理解し、解決策を見出す

* 環境省による仮訳

ために結集し協力した。1985年に「オゾン層保護のためのウィーン条約」が締結され、それによって「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」の枠組みが規定され、議定書は1987年に締結された。これらの国際協定で国連は、オゾン層破壊を止め、回復させ、それによる被害を防ぐことが根本的に重要であることを認めた。モントリオール議定書およびその後の改正と調整によって、人為的なオゾン層破壊物質の消費と生産に関する規制が取り決められた。モントリオール議定書締約国は、3つの評価パネルによって提供される科学的、環境的、技術的、および経済的情報に基づいてそれぞれの国における決定を下している。(Box 1)。

Box 1 環境影響評価パネル

環境影響評価パネルは、成層圏のオゾン層破壊のさまざまな側面を評価するためにモントリオール議定書によって設置された3つの評価パネルの1つである。この3つのパネルは補完的な任務を担っている。科学評価パネルは、オゾン層の破壊状況と関連する大気科学の問題を評価する。技術経済評価パネルは、オゾン層破壊物質の代替技術に関する技術的・経済的情報を提供する。環境影響評価パネル (EEAP) は、成層圏のオゾン層破壊の気候変動と連動した非常に広範囲な影響の可能性を評価する。オゾン層破壊の地表紫外線への影響とそれがもたらす人の健康への影響、水域および陸上生態系への影響、生物地球化学的循環(例えば、炭素、窒素、金属、汚染物質)への影響、大気質への影響、建設および他の用途の材料に及ぼす影響を評価する。18カ国43人の科学者が、4年に1度行われる2018年EEAPのアセスメントに貢献した。

モントリオール議定書の実施により、成層圏オゾン層の地球規模での破壊を阻止することに成功している。1990年代後半以降、成層圏ではオゾン層破壊物質の濃度が減少している。南極では1980年以降毎年のように、ある季節(春季)だけに顕著にオゾンの減少が起こっているが(「オゾンホール」と呼ばれる)、2001–2013年の期間では南極の春季オゾン全量(カラム量)が、小さいけれども統計的に有意な増加トレンドを示した。モントリオール議定書が完全に遵守されれば、世界平均のオゾン全量は21世紀半ばまでに1980年代以前のレベルまで回復すると予測されている。

モントリオール議定書で規制されている化合物の多くはオゾン層破壊物質であるのみならず強力な温室効果ガスでもある。数値モデル研究によると、モントリオール議定書がなければ、オゾン層破壊物質のみによる温暖化効果によって2070年までに地球の平均気温が2℃以上上昇したであろうことが示されている。さらに2016年にモントリオール議定書のキガリ改正が採択されたことにより、オゾン層破壊物質の代替として使用される強力な温室効果ガスであるハイドロフルオロカーボン(代替フロン)の生産と消費が制限されることになった。この改正により、モントリオール議定書の適用範囲がさらに拡大・強化され、成層圏のオゾン層破壊に取り組むだけでなく、これまでの取り組みよりさらに大きく地球規模の気候を保護するためにも取り組むといった効果的な国際条約が作成された。

Box 2 2018 年環境影響評価パネルで取り組まれた国連持続可能な開発目標 (SDGs)



環境影響評価パネルによる研究成果の調査と評価の結果は、以下の国連持続可能な開発目標 (SDGs) に対応している。2. 飢餓をゼロに、3. すべての人に健康と福祉を、6. 安全な水とトイレを世界中に、7. エネルギーをみんなにそしてクリーンに、9. 産業と技術革新の基盤をつくろう、11. 住み続けられるまちづくりを、12. つくる責任つかう責任、13. 気候変動に具体的な対策を、14. 海の豊かさを守ろう、15. 陸の豊かさを守ろう

これらの SDGs の詳細については、

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>を参照

モントリオール議定書が成功した大きな理由の 1 つは、それが質の高い科学に基づいていることであり、それによってオゾン層破壊の原因とメカニズムだけでなく、大気の変化が環境に及ぼす潜在的な影響についての理解も深まった。環境影響評価パネル (EEAP) は、オゾン層破壊とそれによる紫外線の変化や、それらと地球規模の気候変化との間の相互作用が環境に及ぼす影響に関する科学の現状についての評価を提供することを特に任務としている (Box 1)。成層圏のオゾン層破壊と気候変化との間には物理的・生物的な強い関連性があり、モントリオール議定書が気候変化の緩和に直接的に関与することになったため、環境影響評価パネルは変化する地球規模の気候の中でのオゾン層破壊の影響を必然的に扱うこととなる。

この総括要旨は、最新の EEAP4 ヶ年アセスメントからの重要な知見を示し、環境影響の重大な社会的意義を考察する。モントリオール議定書は多様な手段で環境の持続可能性や人の健康と福祉に貢献しているが、その多様な手段を、国連の持続可能な開発目標への貢献及び一貫性という面からも強調した (Box 2)。

成層圏のオゾン層破壊とその環境への影響に関する詳細な情報は、国連環境計画オゾン事務局 (<https://ozone.unep.org>) が発行した全アセスメントレポート及びその他 (Photochemical & Photobiological Sciences journal) を参照されたい。環境影響評価パネルの報告書は、成層圏オゾンの動態、紫外線、および気候変動の相互作用の影響に焦点を当

てることによって、「国連気候変動に関する政府間パネル」(<https://www.ipcc.ch>; ref.にまとめられている)を補完し、地球大気におけるこれらの地球規模の変化の環境への影響の包括的な評価を提供する。

主な調査結果とハイライト

1 成層圏オゾン、気候変化、および地表での紫外線

オゾン層が破壊されると、地表での UV-B が増加する。しかし、モントリオール議定書の成功により、成層圏のオゾン層破壊による現在の UV-B の増加は、熱帯では無視できるレベルであり、中緯度 (30-60°) では小さく (5-10%)、極地でのみ大きくなる。今後数十年にわたって成層圏オゾンが回復すると予測されているため、晴天時 UV インデックス⁶は熱帯以外のすべての緯度で減少し、南極大陸で最大の減少が見込まれている。ここ 10 年間と比較した 21 世紀末の UV インデックスの新たな予測は、南極大陸で 35% 減少、中緯度で 6% まで減少することが示唆されている。しかし、成層圏オゾンレベルはオゾン層破壊物質の減少だけでなく、21 世紀の残りの期間の温室効果ガスの増加による気候変化によっても変化するため、これらの将来予測は不確実である。

将来における全波長域紫外線の変化は、雲、エアロゾル、表面反射率の変化 (例えば、積雪や氷の被覆による) に依存する (図 2)。気候変化によって雲量が増加し、一部の地域では曇が増し、他の地域では曇が少なくなっている。一般的に、雲量の増加は地表での紫外線を減らす傾向があるが、影響は雲の種類によって異なる。エアロゾル (大気中に浮遊している個体粒子、液体粒子) は紫外線を減らしたり散乱させたりする。大気中のエアロゾルの種類と量は、大気汚染物質の排出、火山活動、山火事や砂塵嵐の頻度と規模、そして気候変化の影響を受ける他の多くの要因によって影響を受ける。重度に汚染された地域 (例えば、南および東アジア) では、予想される大気質の改善により、紫外線レベルが工業化前のレベル (つまり、大規模なエアロゾル汚染が発生する前に) まで上昇すると予測されており、その変化の程度は大気汚染物質の排出の削減次第である。

積雪や氷の被覆の高い表面反射率は、反射された紫外線の一部が大気中の空気分子、エアロゾル、および雲によって散乱されて地表に戻されるため、地表面での紫外線を増加させることになる。しかし、極地や山岳地帯における氷や積雪が気候変化によって減少すると、地表からの紫外線の反射が減少するため、これらの地域における地上の紫外線が減少する可能性がある。

⁶ UV インデックスは、特定の場所と時間における日焼けを引き起こす紫外線の強度の国際標準的な尺度。

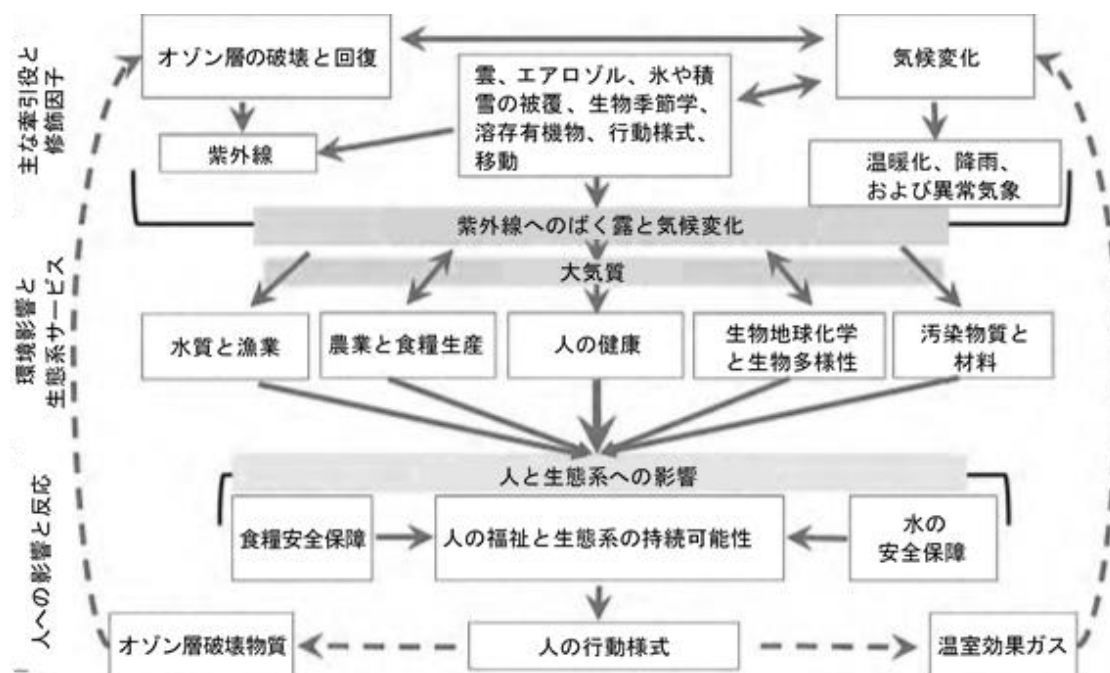


図2 環境への影響と人のウェルビーイングに対する潜在的影響、食料と水の安全保障、生態系の持続可能性(実線)など、成層圏のオゾン層破壊、紫外線、気候変化との関連性と、人の行動(二重矢印の実線)や他のプロセス(破線)によって推進される重要なフィードバック効果との関連性。

1.1 紫外線へのばく露とばく露に対する気候変化の影響

紫外線が生物(人を含む)、天然有機物、汚染物質および物質に及ぼす影響は、それらの紫外線へのばく露に依存する(図2)。これは、地球規模の気候変化の影響を含む、成層圏のオゾン層破壊以外のいくつかの要因によって決定される。成層圏のオゾン層破壊とは異なり、これらの気候変化による影響は、UV-Bだけでなく、UV-A (315-400 nm) および太陽スペクトルの可視領域 (400-700 nm) へのばく露も変化させる。これらの変化の重要性は、UV-B へのばく露によって引き起こされる多くの環境および健康への影響が、程度は様々であるが UV-A および可視光線によっても影響を受けるためである。

人の健康にとって、行動様式は紫外線ばく露の重要な調節因子である。紫外線の個人のばく露は、人口全体平均の10分の1から10倍の大きな違いがあり、人々が屋内、屋外、もしくは日陰の下で過ごす時間に依存している。皮膚や眼のばく露は、衣服やサングラスなどの日よけ製品の使用にもよって異なる。気候変化の結果としての気温上昇や降水量の変化は、日光ばく露に関係する人の行動を変化させると考えられるが、影響の大きさは地球レベルでは非常に変動しやすいと考えられる。皮膚の生物学的構造に対する紫外線量は、皮膚の色素沈着によって影響され、より浅黒い肌は皮膚癌に対する著しい保護効果を有する。例えば気候変化によって引き起こされる海面上昇のために、人が移動した場合(例えば、浅黒い肌の人々が低緯度から高緯度に移動するなど)、彼らが慣れているのとは異なる紫外線条件に遭遇することになる。

植被は多くの陸生生物に届く日光量を変化させ、遮光は建築材料の紫外線へのばく露に影響を与える。例えば気候変化によって引き起こされる干ばつ、火災、害虫による林冠の枯死による植被の変化は、陸生生物の紫外線へのばく露に深刻な影響を与えるだろう。さらに植物の開花、樹木の春の萌芽、動物の出現と繁殖など、重要な生活環の季節的タイミングの変化は、紫外線が季節とともに変化するため、紫外線へのばく露を変化させるだろう。

気候変化に対応して動植物が、極地方向に、より高い標高へ、そして湖や海のより深い所へ移動する時、それらが適応してきた条件とは異なるかもしれない紫外線条件にさらされる。さらに、地球温暖化の結果としての極地での氷や積雪の被覆の減少は、それまでは積雪や氷の下にあった土壌や水域生態系の紫外線へのばく露を増加させるだろう。

水域生態系への紫外線の浸透は、水の透明度、溶存有機物の量、および氷の被覆度に依存する。沿岸及び内水面への溶存有機物及び沈降物質の流入を増加させるような極端な気象現象の増加は、水の透明度の低下による、水域生態系の紫外線へのばく露を減少させる。積雪や氷の被覆の厚さや期間の減少と、湖や海洋の暖かい表層混合層の深さの地球規模の変化は、水生生物の紫外線へのばく露を変化させている。これまでは、気候変化が混合層をより浅くすることで紫外線へのばく露を増加させると予想されていたが、新しいデータによるとある地域の湖と海の混合層が深くなり、他の地域では浅くなっていることを示している。

これらの気候変化に起因する影響は、居住地域、季節、人種、およびその他の状況に応じて、紫外線へのばく露を増減させる可能性がある。成層圏のオゾンと気候の継続的な変化によって引き起こされる紫外線へのばく露と感度の変化は、人、地球上の生命および環境に影響を及ぼす可能性があり、これにはインフラやその他の目的に使用される物質も含め、人々の健康と福祉および生態系の持続可能性に影響を及ぼす。これらの影響のいくつかを次に示す。これらの調査結果は、2018年の4ヶ年アセスメントに記載されているその他のものと共に、国連の持続可能な開発目標の17のうち11に対応している。

2 紫外線へのばく露が人と環境に及ぼす影響

2.1 人の健康への影響

紫外線ばく露の増加は、皮膚がんや白内障、光線過敏症などの紫外線誘発性疾患の発生率を高める。前世紀における皮膚癌の発生率の増加は、主に紫外線へのばく露を増加させる行動様式の変化に起因すると思われる。これらの変化は、非制御下での成層圏オゾンの破壊によって起こる高い紫外線ばく露に対して、人がどれほど敏感であるかを示している。皮膚癌は、主に肌の色が白い人々が住む多くの先進国で最も一般的な癌である。例えばニュージーランドでは、毎年約3,000人が新たに大腸癌と診断されているのに対し、新たに皮膚癌と診断された人は9万人を超える。皮膚癌はまた、これらの国々の多くで最も医療費のかかる癌である。米国における皮膚悪性黒色腫の推定される治療費は、2011年に約4億5,700万ドルで、2030年には約16億ドルに増加すると予測されている。肌の色が白い人々で皮膚悪性黒色腫を発症するリスクの60~96%は、紫外線へのばく露によるものである。2012年に新たに発症した約168,000の黒色腫は、日光の回避から日光浴を求める生活様式の変化の結果として、紫外線への「過剰な」ばく露（歴史上での最小ばく露を超える）に起因すると推定される。モデル研究は、モントリオール議定書の実施により、高レベルの紫外線（2065年までに熱帯地方で40を超えるUVI）に起因する、肌の色が白い人々の皮膚癌の発生率の大幅な増加を含む、健康への壊滅的な影響を回避したことを示している。

紫外線へのばく露は、白内障の発症に寄与し、世界的に視力障害の主な原因となっている（2015年には白内障により1,260万人が盲目に、5,260万人が視覚障害者になる）。特に低所得国では（多くの場合紫外線が強い）白内障手術の機会が限られており、重大な健康上の問題だけでなく、生計の喪失と経済的損失の主な原因となっている。加齢黄斑変性症の原因として、紫外線と可視光線へのばく露の違いは不明のままである。それにもかかわらず、世界的に高齢化している中、現在限られた治療選択肢しかない視覚障害の主要な原因である。したがって危険因子を理解し、予防の可能性を理解することは非常に重要である。

成層圏のオゾン層破壊による高レベルの UV-B への懸念は、多くの国における日焼け防止プログラムを開発する重要な推進力であった。これらのプログラムは、構造的および政策レベルの介入によって支えられ、人々の行動様式の変化を促進することに焦点を当てている。日焼け防止プログラムは、皮膚癌の予防に非常に費用対効果が高いことが示されている。行動変容戦略はリアルタイムの紫外線量（UVI によって提供される）に基づかなければならず、紫外線へのばく露を低減するために衣服、帽子、日焼け止め、サングラスを使用するとともに屋外での時間を制御することを含む。公園、プール、学校などの公共の場に日陰を設け、日焼け止めを入手する機会を改善することで、行動様式の変化を促進することができる。

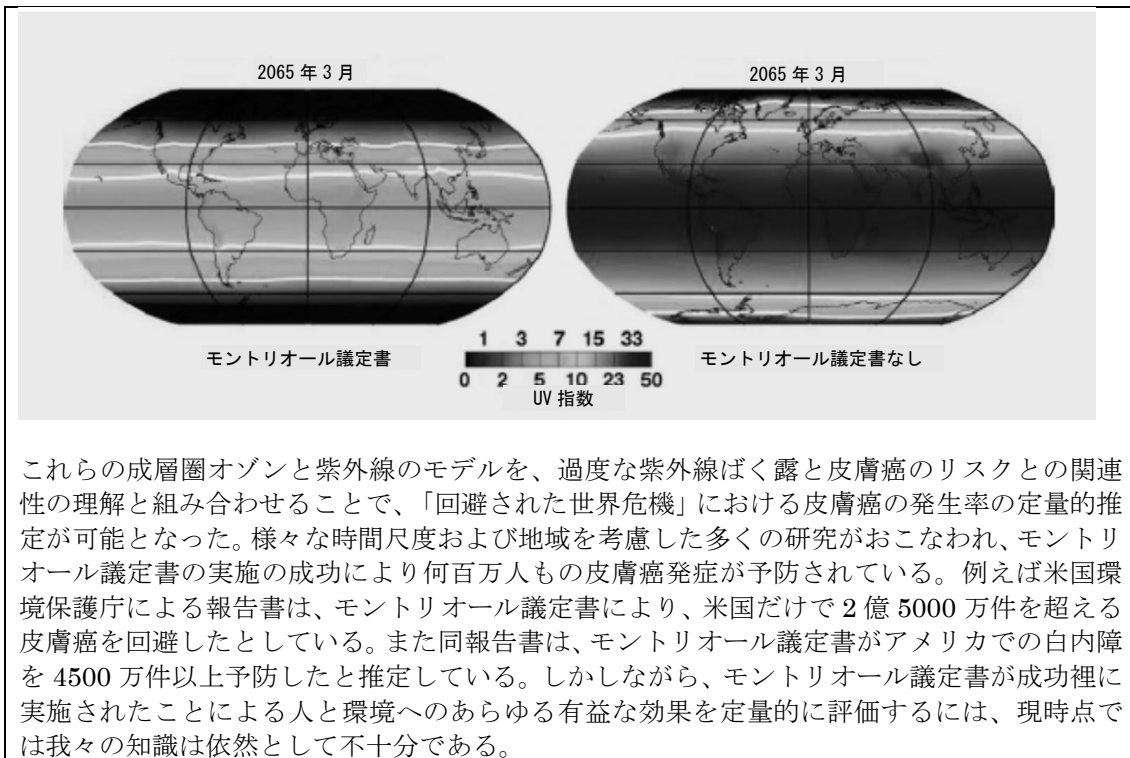
紫外線へのばく露は人の健康に有益でもある。例えば皮膚が紫外線にばく露するとビタミン D が生成され、世界中の多くの人々のビタミンの主要な供給源となっている。ビタミン D は健康な骨、特に乳児期や小児期において重要である。また、紫外線ばく露でビタミン D およびビタミン D と無関係な経路で健康上のさまざまな便益が得られることを示すエビデンスも増えている。例えば、全身性自己免疫疾患（多発性硬化症など）への効果、近視の予防、癌以外の疾患による死亡率低下などである。最近の研究によると、死亡率の低下による恩恵は確実であるとされている。

我々の知識不足、特に、年齢、性別、肌の種類、および場所によって異なる可能性があるため、リスクと利益のバランス維持に必要な紫外線量の計算を妨げている。予測される気候の変化が、さまざまな地域に住む人々のリスクと利益のバランスを変化させるであろう。例えば、ビタミン D 欠乏症のリスクが既に相当なものであることが知られている高緯度で、UV-B の低減はビタミン D 欠乏症のリスクを増大させるであろう。逆に気温の上昇は、寒冷地の人々に屋外で過ごす時間を増やし、UV-B だけでなく、あらゆる波長の日射にさらされるようになり、皮膚癌や白内障に関連するリスクを増大させる。

Box 3 「回避された世界危機」における環境への影響

このアセスメントは、モントリオール議定書とその改正の効果的な実施により発生し、また、発生が予測されている成層圏オゾンの変化による環境影響に焦点を当てている。現在のところ、関連する研究が不足しているため、成層圏オゾン層がモントリオール議定書によって保護されていなかった場合に生じたであろう健康および環境への影響を十分に評価することができない。しかし、この「回避された世界危機」に関しては、モントリオール議定書が成功裡に実施されたための効果であることを提供することは注目に値する。

いくつかのモデル研究は、モントリオール議定書がなかった場合、すなわち「回避された世界危機」のシナリオで成層圏オゾン層の変化について報告している。いずれも、成層圏オゾンの減少が進行していることを示しており、それは時間の経過とともに加速し、今世紀後半までに地球全体に影響を及ぼしたとしている。この地球規模の成層圏オゾンの崩壊は、現在の極値である 25 を超える UV インデックスが地球のほぼすべての居住地域で一般的になり、熱帯地方では 40 という高い値になり、WHO が現在「極値」と考えている UV インデックスのほぼ 5 倍となる。以下の図は、予測された UV インデックス（UVI;左）と「回避された世界危機」（右）のそれとの比較である。



2.2 大気質への影響

紫外線は、放出された多くの化合物の光化学反応を促進し、地表付近のオゾンや粒子状汚染物質などの二次汚染物質を発生させる。将来の成層圏オゾンの回復と気候によって、紫外線の減少や成層圏オゾンの下方輸送の増加が起こり、それが地表付近のオゾンを変化させ、人の健康と環境に重大な影響を及ぼす可能性がある。数値モデル研究によって、米国では、成層圏オゾンの回復による紫外線の減少は、一部の都市部においては地表付近のオゾンの減少につながるが、それ以外の地域においてはわずかなオゾンの増加をもたらすであろうということが示された。

紫外線と気候の変化は大気質に影響を与え、人の健康に大きな影響を与える可能性がある。最近の多くの国際的なアセスメントは、劣悪な大気質は世界的に重大な健康問題であり、世界的に環境要因による最大の死亡原因と推定されると結論した。例えば微粒子状物質（PM_{2.5}）にさらされて 2015 年には 420 万人が死亡した。多くの人々はすでに劣悪な大気質の影響を受けているため、紫外線の比較的小さな変化でさえ人々の健康に重大な影響を及ぼす可能性がある。

2.3 農業と食料生産への影響

紫外線の若干の増加が、作物収量と植物生産性に実質的に悪影響を及ぼすことを示唆する証拠はほとんどない。モントリオール議定書が存在せず、紫外線が大幅に増加した場合、食糧生産量がどのような影響を受けるのかは不明である。ある分析は、成層圏オゾン層の破壊が最も顕著な地域（高緯度）で行われた多くの実地調査のデータに基づき、成層圏オゾンの 10% の減少に相当する紫外線の 20% の増加でも、植物生産量は 6% しか減少しないと結論づけた（すなわち、紫外線 3% 増加ごとに 1% の成長減少）。この関係が現在の 2 倍を超える紫外線レベル（すなわち、「回避された世界」シナリオ（Box 3））に対してどの程度成り立つかは不確実であり、重要な知識の欠落であることを表している。

モントリオール議定書は、地球温暖化を増大させるオゾン層破壊物質とそのいくつかの

代替物質の廃止による気候変化の緩和に貢献することで、気温の上昇、干ばつ、極端な天候への農作物の脆弱性を軽減したと考えられる。現在、南半球でのオゾン層破壊がこの地域の大気循環パターンを変化させており、それが気象条件、海面水温、海流、山火事の頻度に影響を与えていることが明らかになっている。地域規模では、成層圏のオゾン層の破壊と気候変化に起因する南半球の降雨量増加は、南アメリカの農業生産性の増加と関連している（Box 4）。しかしながら、成層圏オゾンの「穴」が回復するにつれて、これらの有益な効果は逆戻りするかもしれない。北半球でも同様の、小規模ではあるが、成層圏のオゾン層破壊が気候に及ぼす影響が生じている可能性があるが、これらの変化を環境の影響に結び付ける報告はまだない。

干ばつ、高温、二酸化炭素濃度の上昇などの気候変化要因は、紫外線が作物に及ぼす影響を変化させる可能性があるが、影響は複雑で多くの場合生育条件に左右される。場合によっては、これらの要因が紫外線に対する感受性を高める可能性がある（例えば、二酸化炭素の増加はトウモロコシの紫外線に対する防御機構を弱める可能性がある。）その他の場合では、紫外線へのばく露は作物の干ばつ耐性を高めるなど、気候変化の影響を変化させる可能性がある。成層圏オゾンの回復による紫外線の減少は、農村部の地表レベルのオゾンの増加につながり、作物の収穫量に悪影響を及ぼす可能性がある。これらの、そして他の紫外線と気候変化の相互作用を理解することは、環境変化の進行に直面しながら作物収穫量を維持するための適切な農業の実践に関して生産者や畜産家に情報を提供することができる。

紫外線は植物に有益な影響をも与える可能性があり、これらの影響は植物の成長と発達を調節するように作用する特異的な光受容体によって媒介されることが多い。これらの有害ではない効果には、食物の栄養価の変化や害虫や病原体に対する植物の抵抗性の変化につながる植物化学の変化が含まれる。その結果、成層圏のオゾンや気候の変化、あるいは農業実践の変化（例えば、植栽日や播種密度）の結果としての紫外線ばく露の減少は、植物防御機構を低下させ、収量に対する直接的な影響以外の点で食料安全保障に影響を与える可能性がある。ある種の農作物では、植物の耐寒性、食品の品質、および害虫に対する抵抗性を操作するために紫外線がますます利用されるようになっている。



り、一部の地域では農業生産性が向上し、他の地域では干ばつ状態が悪化している(C)。南極東部と東部アンデスでは、乾燥条件が湖の塩分濃度の上昇をもたらし、湖の動物相を変化させた。



矢印は生物多様性への影響の方向を示す

上向き=正、下向き=負の影響、双方向の矢印は生物多様性の変化を示す。

2.4 水質と漁業への影響

紫外線へのばく露量と混合層深度の変化は、水域生態系の基本構造を変化させ、その結果、その生態系は（例えば、水質や漁業生産性など）をその地域特有の方法でその役割を果たしている。商業的に重要な仔魚の多くの体は透明で、紫外線によって誘発される損傷に敏感である。この影響の受けやすさは、表層水中の稚魚の分布と紫外線への高いばく露と相まって、1年魚の生存率を低下させ、成魚の漁業を低下させる可能性がある。対照的に、澄んだ湖の透明度の低下は、在来種に悪影響を及ぼす可能性のある紫外線に敏感な温水魚の侵入の可能性を高める可能性がある。

気候変化に伴う豪雨や氷河や永久凍土の融解は、紫外線を吸収する溶存有機物と懸濁物質の濃度と色調を増加させている。このことは、多くの陸水および沿岸水域の「褐変」につながり、その結果、紫外線が表層水の寄生虫や病原体が生息する表層水を消毒する貴重な生態系の役割の喪失につながる。干ばつの頻度と期間の地域ごとの増加は、水の透明度を高め、太陽の消毒効果の低下をもたらす、魚に重要な餌料であるプランクトンの分布深度を変化させるという逆の効果をもたらす。

2.5 生物地球化学的循環、気候システムのフィードバック、および生物多様性への影響

成層圏のオゾンと気候の変化は、太陽光、ひいては温室効果ガスと水質によって引き起こされる生物地球化学的循環に影響を与える。太陽紫外線や可視光線へのばく露は、天然有機物 (NOM、例えば、陸生植物のリター (落葉落枝)、水生生物のデトリタス (有機堆積物)、溶存有機物) の分解、および汚染物質の変化を促進しうる。NOM の光分解は二酸化炭素や亜酸化窒素を含む温室効果ガスの放出をもたらす。気候変化による干ばつ、山火事、永久凍土の融解の増加は、光分解を増加させる可能性があり、それによって、地球温暖化における正のフィードバックを促進する。しかし、この影響の規模に関しては、依然として重要な知識が欠落している。

水生と陸生生物の種は紫外線に対する耐性が異なり、これらの違いは上昇した紫外線の条件下で生物の群集の構成や多様性の変化につながる可能性がある。紫外線はまた、草食動物の食性と捕食者-被食者の相互作用を変化させ、それが生態系における栄養相互作用、エネルギー移動、食物網を変化させる。現在、南半球におけるオゾンによって引き起こされる地域気候の変化は、南極のコケ類や他の植物群落と同様に、南アメリカのアルティプラーノの独特な高地森林帯で生息する多くの種の生息地と生存を脅かしているが、一部の海鳥や海獣の繁殖成功を高めている (Box 4)。モントリオール議定書が生態系の生物多様性の維持にどの程度貢献しているかは不明だが、水域生態系における種の多様性の喪失は紫外線への高ばく露に関連していることが知られており、生態系の健康と安定性、そしてそれらが人に提供する利益の低下を引き起こす可能性がある。

2.6 汚染物質および材料への影響

気候や成層圏オゾンの変化と組み合わさった環境への汚染物質の放出の増加は、人の健康や陸上および水域生態系に影響を与える。紫外線は、汚染物質の生物地球化学的循環と直接および間接的な光反応による分解に影響を与える重要な因子の 1 つである。しかし、豪雨や干ばつなどの気候変化の影響も、紫外線へのばく露を増減させることによって、汚染物質の光分解に大きな影響を与える。さらに、着色された溶存有機物の流出量の増減は、水域生態系における直接光反応と間接光反応のバランスに影響を与える。これらの気候変化の影響は地域の状況に依存しており、人の健康と環境に対する汚染物質の影響の予測と管理には課題が残る。

UV-B へのばく露は、汚染物質の毒性を変化させる上で重要な役割を果たす。紫外線にさらされると、魚類や両生類などの水生生物に対する農薬や多環芳香族炭化水素 (PAH) などの汚染物質の毒性が高まる。逆に、UV-B へのばく露は最も毒性の強い形のメチル水銀をより毒性の低い形に変え、魚への水銀の蓄積を減少させる。しかしながら、ノルウェー南部などの一部地域の内水面では、溶存有機物の長期的な増加により、水中の紫外線ばく露が減少する。このことは、水の紫外線透過性低下の結果として起こりうる、既に観察されている、魚のメチル水銀の増加に寄与しているかもしれない。紫外線は、多くの有機汚染物質や水系病原体の分解にも大きな役割を果たしている。紫外線による光分解の過程は、成層圏オゾンの変化の影響を受ける可能性があるが、溶存有機物のような他の要因は水中の紫外線の調節に重要であり、光分解により大きな影響を与える。モデル化手法の進歩により、水質汚染物質の行方に対する地球規模の変化の影響の定量化が改善されつつある。

日焼け止めは、日焼け防止の一連のアプローチの一つとして、化粧品を含めて広く使用されている。しかし、日焼け止めが沿岸水域に流れ込み、水域生態系に影響を与える可能性があることが現在では認識されている。人工日焼け止めのサンゴ、ウニ、魚、および他の水生生物への毒性は、米国ハワイ州で一部の日焼け止めの使用を禁止する法律を可決させ、欧州連合も同様の法律を検討するに至っている。

マイクロプラスチック(5mm以下のプラスチック粒子)は今や世界の海に遍在しており、多くの生物がそれを摂取することが知られ、海洋生態系に深刻な脅威をもたらしている。マイクロプラスチックは、紫外線によるプラスチック製品の劣化と分解、および太陽光にさらされたゴミによって形成されている。マイクロプラスチック汚染物質は、世界で食用として販売されている魚の最大 20%以上に含まれている。マイクロプラスチックやより小さいナノプラスチックの毒性は不明であるが、高い温度と紫外線がプラスチックの細分化を加速させ、潜在的に食料安全保障を脅かしている。

紫外線にさらされると、有機材料の機能的統合性が損なわれ、日常的に露出しているプラスチックや木材など、建築に使用される屋根やパイプラインの耐用年数を短くする。ごく最近まで、包装や建築に使用されるプラスチックは、耐久性や性能を念頭に選択され最適化されていた。しかし、持続可能性の向上、例えば「グリーンビルディング」への傾向が現在重要視されていることから、環境的にも受け入れられるような選択が求められている。これには、必要に応じてプラスチックに替わって、再生可能で、カーボンニュートラルで内包エネルギーの少ない木材の使用の増加が含まれる。これらの材料のいくつかは、紫外線にさらされると老化を促進される危険性がある。現在は、プラスチック材料および木材塗料用の新しく、より安全で、効果的で、そしてより環境に優しい添加剤(着色剤、可塑剤、および安定剤)を特定し、開発する努力が進められている。気候変化のために予測される、より厳しい気候は、この分野においてさらに多くの努力が求められるであろう。

モントリオール議定書で規制されているトリフルオロ酢酸(TFA)は、天然にも商業的にも生産されている。環境中にトリフルオロ酢酸(TFA)を放出する複数の人為的発生源がある。モントリオール議定書に関連する情報源には、CFCの代替物質であるHCFC、HFC、およびHFOが含まれる。これらの化学物質は大気中でTFAに分解することが知られているが(図3; Box 5)、表層水中のTFA濃度のわずかな増加に寄与しているにすぎない。これが、人や環境に危険をもたらすことは予想されていない。

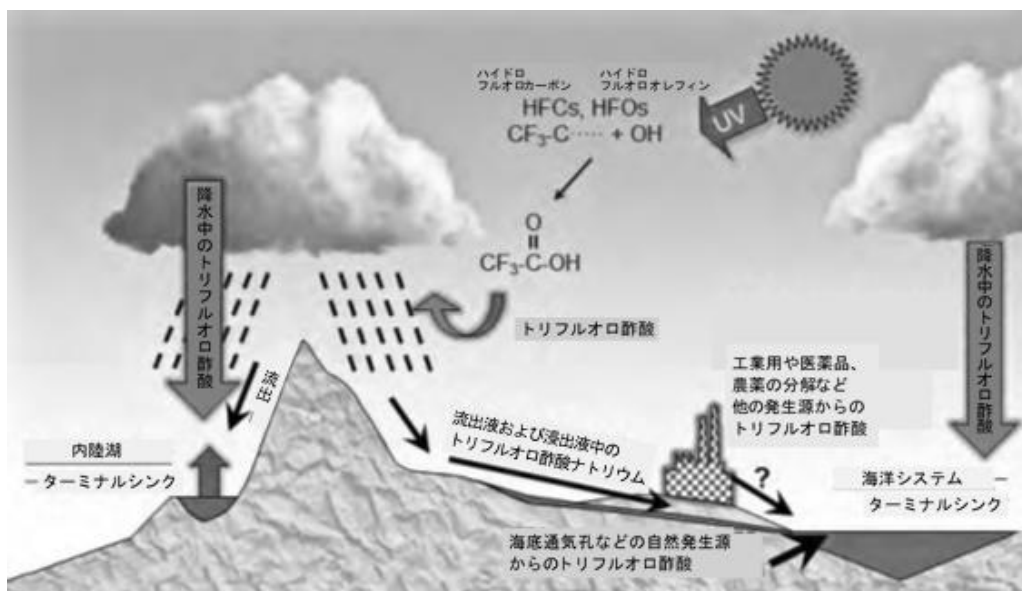


図3 大気中のHFCとHFOから生成されるトリフルオロ酢酸(TFA)は大気中で大気から急速に水に分離される。それは土壌や表層水の陽イオンと結合し、吸水性の水域(塩湖)や海に蓄積する。(出典) Hongjie (2016)より許可を得て変更

Box 5 オゾン層破壊物質の代替品による環境影響

クロロフルオロカーボン（CFC）の利点の 1 つは、それらが下層大気では不活性であり、大気質に直接影響を与えないことだ。それらの代替品は特に安定性の低いことが選択されており、これらの化合物はモントリオール議定書の履行に直接関係しているため、大気および環境の質への影響を考慮する必要がある。冷却に焦点を当てたこれらの代替品には、ハイドロフルオロカーボン（HFC）およびハイドロフルオロオレフィン（HFO）、炭化水素およびアンモニアが含まれる。

HFC と HFO

トリフルオロ酢酸（TFA）は、大気中の HCFC、HFC、および HFO から生成される難分解性物質である。環境中には他にも多くの TFA の発生源があるが、それらは規制されていないため、地球規模の生産および環境への放出に関するデータは事実上存在しない。HFC は大気中でゆっくりと分解し（1~100 年）、世界的に分布するようになる。対照的に、HFO-1234yf は急速に（数日・数週間）TFA に分解する。その結果、HFO-1234yf が放出された近くで分解が起こる。このため、表層水中の TFA 濃度は HFCs よりも局所的に高くなる可能性がある。それでも、これらの局所的な TFA の堆積が、特に海で最終的な希釈が起こった場合に、環境へのリスクをもたらすことを示唆するエビデンスは今の所ない。

中国、アメリカ、ヨーロッパでの TFA 生産量の推定値は、希釈がないと仮定すると、マイクロコズム研究による TFA-ナトリウムの慢性的な「無影響濃度」（NOEC）である 1000 万 ng/L より数桁低い。

全体的に見て、表層水中の TFA ナトリウムの現在および予測された濃度へのばく露が、人の健康および環境へのリスクは極めて小さいという我々の以前のアセスメントの結論と矛盾する新しいエビデンスはない。最近のこれに関するレビューは同様の結論に達した。

炭化水素

ODS 代替物質として使用される炭化水素（プロパンや n-ブタンなど）の放出は、大気中の炭化水素の負荷を増大させ、潜在的に地上レベルのオゾン濃度を増加させる可能性がある。炭化水素冷媒の排出が大気質に及ぼす影響についての推定は学術論文ではほとんどない。米国内の 3 都市を対象とした一つの最近の評価では、現在の不確実性が浮き彫りになり、対流圏オゾンの「最悪の場合」の増加量は約 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ だが、現実的な推定値は 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ とした。これらの数値は、120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えている現在の年間最大対流圏オゾン濃度と比較される。

アンモニア

大気中のアンモニアはいくつかの化合物と反応しエアロゾルを生成し、それにより粒子状大気汚染物質（PM_{2.5}）の濃度を上昇させる。しかし、現在排出されている CFC、HCFC、および HFC のすべてをアンモニアで完全に代替することは（年間 170,000 トンと推定：G. Velders、私信、2018 年 2 月、農業（34,500,000 トン）から、あるいは産業および居住活動（8,500,000 トン）からの推定年間アンモニア排出と比較して少ない。

3 結論と知識の欠落

モントリオール議定書は、地球規模の成層圏オゾン層破壊とその結果引き起こされる UV-B の大幅な増加を防止することで、人の健康と環境への重大な悪影響を防止している（Box 3）。

私たちは、モントリオール議定書が成層圏のオゾン層破壊の抑制に成功したために回避されてきた人の健康と環境への影響についての定性的予測に自信を持っている。しかしながら、モントリオール議定書の成功から得られる多くの利益の定量化は依然として大きな課題であり、気候変化と人の適応の程度を考慮すると、紫外線ばく露における将来の傾向は不確実なままである。

最近報告された CFC-11 排出量の予想外の増加は、成層圏のオゾン層破壊への影響は少なく、したがって人の健康または環境への影響も小さいと予想されている。しかし、そのような予期せぬ排出量が将来も継続して増加し、または新たな脅威が発生した場合、人の健康および環境への影響は相当なものになる可能性がある。新たな脅威としては、温室効果ガスによる温暖化防止のために提案された「地球工学」活動が含まれる可能性があり、地表に到達する紫外線に影響を及ぼす可能性がある。特に、硫酸エアロゾルを成層圏に注入して地表面の日射を減少させるという提案は、成層圏オゾンと紫外線に対して重要な副作用をもたらす可能性が高い。大量の ODS が大気中に残っていれば、硫酸エアロゾルは成層圏のオゾン損失を加速させる可能性がある。オゾンによる吸収と硫酸塩による散乱の複合的な変化は、紫外線の地上レベルへの透過に対してスペクトル的に複雑な結果を及ぼし、直接紫外線と拡散紫外線の比率は系統的に大きくなる。

将来の成層圏オゾンの変化による環境への影響の定量化の改善という課題に対処するには、現在の知識におけるいくつかの大きな欠落に対処する必要がある。第一に、多様な生物の基本的な反応を変化させる上で、紫外線の異なる波長の相対的有效性（つまり、生物学的スペクトル重み係数）をより良く理解する必要がある。これにより、より一般的な日射よりも、特に UV-B（したがって成層圏のオゾン層破壊に関連する）に対するばく露の変化をより適切に特定することが可能となる。第二に、人の健康と環境への広範な影響にまたがる用量-反応関係のより良い理解が必要である。まとめると、これらは成層圏オゾン層破壊や気候変化が生物とその生態系、そしてプラスチック、木材構造、衣服などの材料に及ぼす影響のスケールリングやモデリングの改善を支援するだろう。

地理的範囲の変化（気候変化によって引き起こされる人や他の種の移動を含む）および気候変化による生活環の季節的タイミング変化の結果として、人を含む多くの生物が、紫外線と他の環境要因との異なる相互作用的な組み合わせを経験することは明らかである。これらの環境変化は、コミュニティ構造の変化とともに起こり、成長、繁殖、そして生存に間接的な影響を及ぼすだろう。同時に複数の要因からなる環境変化を背景とした紫外線の変化に対して、人と生態系がどのように反応するかは、依然として大きな知識の欠落である。これらの影響を定量化することは極めて困難であり、その結果の多くは予測が困難な人の行動様式や社会的反応に左右される。

紫外線への高いばく露に関する懸念の焦点は、歴史的に人の健康に当てられてきた。人の福利のための重要な、「生態系サービス」を提供する上での陸域および水域生態系の重要性に加えて、環境の持続可能性と生物多様性の維持は健全な惑星を維持するために極めて重要である。環境影響評価パネルの扱うテーマは、我々の生活する惑星の複雑さと相互関連性の一部を包含しているが、モントリオール議定書の成功は複雑な環境問題に対して、世界が団結し、そして成功裡に行動することが可能であることを実証している。

4. 参考文献

- 環境省. 2009. 化学物質ファクトシート (2012 年度版).
<http://www.env.go.jp/chemi/communication/factsheet.html>
- 環境省. 2015. 紫外線環境保健マニュアル.
- 環境省. 2006. 平成 17 年度フロン等オゾン層影響微量ガス監視調査.
- 環境省. 2018. 平成 29 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. 2012-2020. オゾン層・紫外線の年のまとめ.
- 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. 10. 3. 2011 年春季北極上空で観測史上最大のオゾンが破壊—北極上空のオゾン破壊が観測史上初めて南極オゾンホールに匹敵する規模に— (プレスリリース).
<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2011/20111003/20111003.html>
- 池鯉鮒悟.2012.国内の日射量変化について.Journal of JSES vol38.No.5
- 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. 2012. ハロン等抑制対策に関する報告書 (平成 23 年度).
- Anstey, J.A., Osprey, S.M., Alexander, J., Baldwin, M.P., Butchart, N., Gray, L., Kawatani, Y., Newman, P.A., and Richter, J.H. (2022). Impacts, processes and projections of the quasi-biennial oscillation. *Nat Rev Earth Environ.* DOI: 10.1038/s43017-022-00323-7
- Bègue, N., D. Vignelles, G. Berthet, T. Portafaix, G. Payen, F. Jégou, H. Benchérif, J. Jumelet, J.P. Vernier, T. Lurton, J.-B. Renard, L. Clarisse, V. Duverger, F. Posny, J.-M. Metzger, and S. Godin-Beekmann, 2017. Long-range transport of stratospheric aerosols in the Southern Hemisphere following the 2015 Calbuco eruption, *Atmospheric Chemistry and Physics.*, 17, 15019–15036, doi:10.5194/acp-17-15019-2017.
- 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.
- De Laat, A. T. J., van der A, R. J., Allaart, M. A. F., van Weele, M., Benitez, G. C., Casiccia, C., Paes Leme, N. M., Quel, E., Salvador, J., & Wolfram, E. (2010). Extreme sunbathing: Three weeks of small total O₃ columns and high UV radiation over the

- southern tip of South America during the 2009 Antarctic O₃ hole season. *Geophysical Research Letters*, 37, L14805. doi:10.1029/2010GL043699
- 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.
- Hongjie H, 2016, Typical Photovoltaic Backsheet Failure Mode Analysis and Comparison Study with Accelerated Aging Tests. DuPont report, DuPont China R&D Center, Shanghai, China Report
- Hurwitz MM, Newman PA, Garfinkel CI. 2011. The Arctic vortex in March 2011: a dynamical perspective, *Atmospheric Chemistry and Physics* 11:22113-22127.
- Keppler F, Hamilton JTG, Brass M, Rockmann T. 2006. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature* 439:187-191.
- Kudo R, Uchiyama A, Ijima O, Ohkawara N, and Ohta S. 2012. Aerosol impact on the brightening in Japan. *Journal of Geophysical Research*, vol.117,do7208, doi:10.1029/2011jd017158
- 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.
- Manney GL, Santee ML, Rex M, Livesey NJ, Pitts MC, Veefkind P, Nash ER, Wohltmann I, Lehmann R, Froidevaux L, Poole LR, Schoeberl MR, Haffner DP, Davies J, Dorokhov V, Gernandt H, Johnson B, Kivi R, Kyrö E, Larsen N, Levelt PF, Makshtas A, McElroy CT, Nakajima H, Parrondo MC, Tarasick DW, von der Gathen P, Walker KA, Zinoviev NS. 2011. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 echoed the Antarctic ozone hole. *Nature* 478:469-475.
- 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.
- Miyagawa K, Sasaki T, Nakane H, Petropavlovskikh I, Evans RD. 2009. Reevaluation

- of long-term Umkehr data and ozone profiles at Japanese stations. *Journal of Geophysical Research* 114.D07108. doi:10.1029/2008JD010658.
- Muto J, Kuroda K et al. 2007. Accumulation of elafin in actinic elastosis of sun-damaged skin: Elafin binds to elastin and prevents elastolytic degradation. *Journal Invest Dermatol* 127:1358-1366,
- 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.
- Newman, P. A., J. S. Daniel, D. W. Waugh and E. R. Nash 2007. A new formulation of equivalent effective stratospheric chlorine (EESC), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 4537-4552, doi: 10.5194/acp-7 -4537-2007.
- NOAA. 2005. Northern hemisphere winter summary 2004-2005.
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/winter_bulletins/nh_04-05/index.html
- Pagoon H, Zucchi H, et al. 2015. Biological effects induced by specific advanced glycation end products in the reconstructed skin model of aging. *BioRes Open Access* 4:54-64,
- Plumb, R. A., and R. C. Bell 1982. A model of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 335-352.
- 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.
- Reinsel GC, Weatherhead EC, Tiao GC, Miller AJ, Nagatani RM, Wuebbles DJ and Flynn LE. 2002. On detection of turnaround and recovery in trend for ozone. *Journal of Geophysical Research* D107, doi:10.1029/2001JD000500.
- Rigby M, Park S, Saito T, Western LM, Redington AL, Fang X, Henne S, Manning AJ, Prinn RG, Dutton GS, Fraser PJ, Ganesan AL, Hall BD, Harth CM, Kim J, Kim KR, Krummel PB, Lee T, Li S, Liang Q, Lunt MF, Montzka SA, Mühle J, O'Doherty S, Park MK., Reimann S, Salameh PK, Simmonds P, Tunnicliffe RL, Weiss RF, Yokouchi Y. and Young D. 2019. Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations. *Nature* 569:546-550
- Saito T, Fang X, Stohl A, Yokouchi Y, Zeng J, Fukuyama Y, Mukai H. 2015: Extraordinary halocarbon emissions initiated by the 2011 Tohoku earthquake. *Geophysical Research Letters*, 42: 2500-2507.
- Sakazaki T, Fujiwara M, Mitsuda C, Imai K, Manago N, Naito Y, Nakamura T, Akiyoshi H, Kinnison D, Sano T, Suzuki M and Shiotani M. 2013. Diurnal ozone variations in the stratosphere revealed in observations from the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) on board the International Space Station

- (ISS). *Journal of Geophysical Research*, 118:2991-3006, doi:10.1002/jgrd.50220.
- Sakazaki T, Shiotani M, Suzuki M, Kinnison D, Zawodny JM, McHugh M, and Walker KA. 2015. Sunset-sunrise difference in solar occultation ozone measurements (SAGE II, HALOE, and ACE-FTS) and its relationship to tidal vertical winds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15:829-843.
- 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.
- Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely III, R. R. and Schmidt, A., 2016: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, 10.1126/science.aae0061.
- Solomon, S., R. R. Garcia, and F. Stordal 1985. Transport processes and ozone perturbations, *Journal of Geophysical Research.*, 90, 12981-12989.
- Solomon, S., D. Kinnison, R. Garcia, J. Bandoro, M. Mills, C. Wilka, R. Neely III, A. Schmidt, J.E. Barnes, J.-P. Vernier, and M. Höpfner, 2016a. Monsoon circulations and tropical heterogeneous chlorine chemistry in the stratosphere, *Geophysical Research Letters.*, 43, 12,624–12,633, doi:10.1002/2016GL071778.
- 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.
- 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. 2011. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2010 assessment.
- UNEP. 2012. Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer 9th edition.

- UNEP. 2014. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 assessment.
- UNEP. 2018. Environmental effects and Interactions of Stratospheric Ozone Depletion, UV Radiation, and Climate Change: 2018 assessment Report.
- U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere. 1976. US Standard Atmosphere.
- 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.1994. Scientific assessment of ozone depletion: 1994.
<https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/1994/>.
- 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
- WMO. 2014. Scientific assessment of ozone depletion: 2014
https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2014/ozone_asst_report.html
- WMO. 2014. Scientific assessment of ozone depletion: 2014 Assessment for decision-makers
- WMO. 2015. Scientific assessment of ozone depletion: 2014 Twenty Questions and answers about the ozone layer:2014 update
- WMO. 2018. Scientific assessment of ozone depletion: 2018
- Yoshinaga E, Kawada A, et al. 2011 Nε-(carboxymethyl)lysine modification of elastin alters its biological properties: Implications for the accumulation of abnormal elastic fibers in actinic elastosis. *Journal of Investigative Dermatology* 132:315-323,
- 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 Pyrimidine Dimer	シクロブタン型 2 量体
CTM	Chemical Transport Model	化学輸送モデル
DLR	Deutsches 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
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 Erythral 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	アメリカ航空宇宙局
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	アメリカ海洋大気庁

	Administration	
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
SMILES	Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder	超伝導サブミリ波リム放射サウンダ
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