

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 ₃ 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	1,100
	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
	3 月	オゾン層保護法の一部改正
1991 年	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
	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
	5 月	「CFC 破壊処理ガイドライン」を公表（環境庁）
1996 年	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）
	9 月	モントリオール議定書第 9 回締約国会合開催（モントリオール） 臭化メチルの削減計画の前倒し、臭化メチルの非締約国との貿易の禁止、不法取引防止のためのライセンシングシステムの導入などを合意 CFC 等の回収・再利用・破壊の促進方策をとりまとめ（オゾン層保護対策推進会議）
1998 年	6 月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律第 3 条第 1 項の規定に基づく同項第 1 号から第 3 号に掲げる事項」（告示）の一部改正 「特定家庭用機器再商品化法」(家電リサイクル法)制定(家電製品からの冷媒フロン回収)
	11 月	モントリオール議定書第 10 回締約国会合開催（カイロ）
1999 年	3 月	「CFC 破壊処理ガイドライン」を改訂（環境庁）

	12 月	ウィーン条約第 5 回締約国会議及びモントリオール議定書第 11 回締約国会合開催（北京）HCFC の生産量規制導入などを合意 「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律施行令」（政令）の一部改正
2000 年	7 月	「フロン回収の手引き」を公表（環境庁） 「国家ハロンマネジメント戦略」を UNEP に提出（環境庁他）
	12 月	モントリオール議定書第 12 回締約国会合開催（ブルキナファソ・ワガドゥグ）
2001 年	3 月	家電リサイクル法施行
	6 月	「特定製品に係るフロン類の回収及び破壊の実施の確保等に関する法律」（フロン回収・破壊法）制定
	7 月	「国家 CFC 管理戦略」を UNEP に提出（環境省他）
	11 月	モントリオール議定書第 13 回締約国会合開催（コロンボ）
2002 年	4 月	フロン回収・破壊法（業務用冷凍空調機器からのフロン回収破壊）施行
	7 月	日本、改正モントリオール議定書（1997 年／1999 年改正）を受諾 「使用済自動車の再資源化等に関する法律」（自動車リサイクル法）制定、フロン回収・破壊法の一部改正
	9 月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律施行令」（政令）の一部改正
	10 月	フロン回収・破壊法（カーエアコンからのフロン回収破壊）施行
	11 月	ウィーン条約第 6 回締約国会議及びモントリオール議定書第 14 回締約国会合開催（ローマ）
2003 年	1 月	「特定家庭用機器再商品化法施行令」（政令）の一部改正（家電製品からの断熱材フロン回収）
	11 月	モントリオール議定書第 15 回締約国会合開催（ナイロビ）
2004 年	3 月	モントリオール議定書第 1 回特別締約国会合開催（モントリオール）
	11 月	モントリオール議定書第 16 回締約国会合開催（プラハ）
	12 月	「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律施行令」（政令）の一部改正
2005 年	1 月	自動車リサイクル法全面施行（自動車リサイクルシステムの本格稼働）
	7 月	モントリオール議定書第 2 回特別締約国会合（モントリオール）
	12 月	ウィーン条約第 7 回締約国会議及びモントリオール議定書第 17 回締約国会合開催（ダカール）
2006 年	1 月	「臭化メチルの不可欠用途全廃のための国家管理戦略」を UNEP に提出（環境省・農林水産省）
	5 月	「ハロン破壊処理ガイドライン」を公表（環境省）
	6 月	フロン回収・破壊法の一部改正（業務用冷凍空調機器からのフロン回収強化）
	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）
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）
2023 年	10 月	モントリオール議定書第 35 回締約国会合開催（ナイロビ）

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切な措置をとること（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。

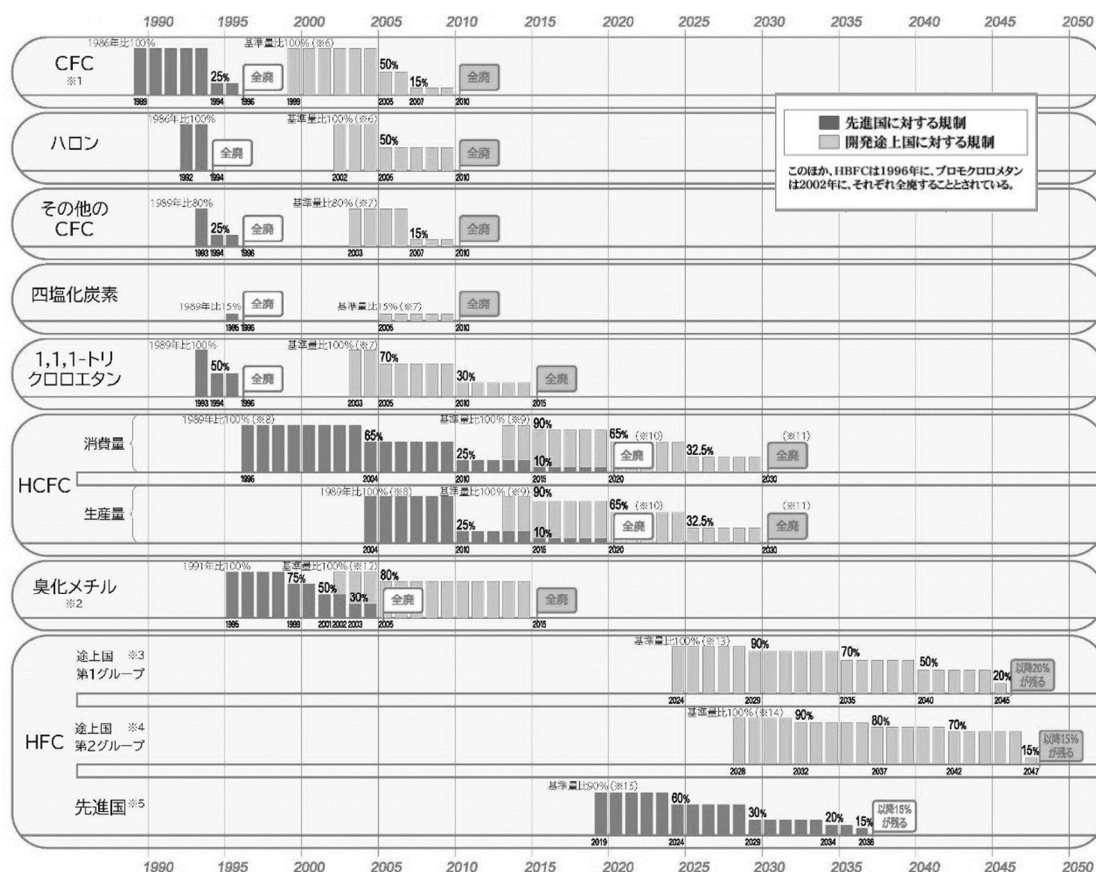


図 4-1 モントリオール議定書に基づく段階的削減スケジュール

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 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⁶)。

※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。

⁶ 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

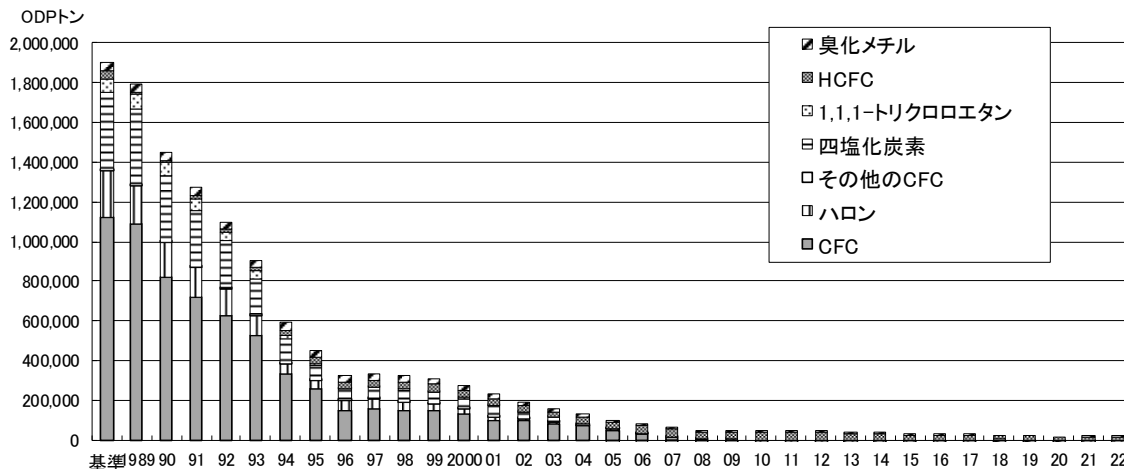


図 4-2 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の生産量の推移（1989～2022 年）
ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完（HCFC を除く）し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完（先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完）。単位は ODP トン。（出典） UNEP オゾン事務局ウェブサイト

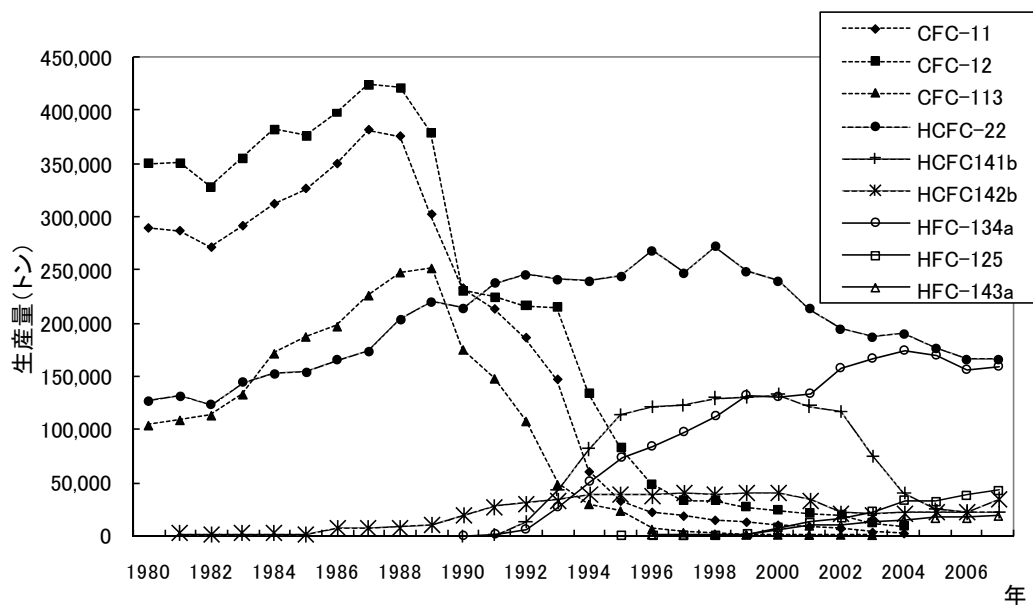


図 4-3 主要なフロン年別生産量の推移（1980～2007 年）
集計は AFEAS に登録のあったデータのみ。単位は重量トン。
（出典） The Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS) ウェブサイト

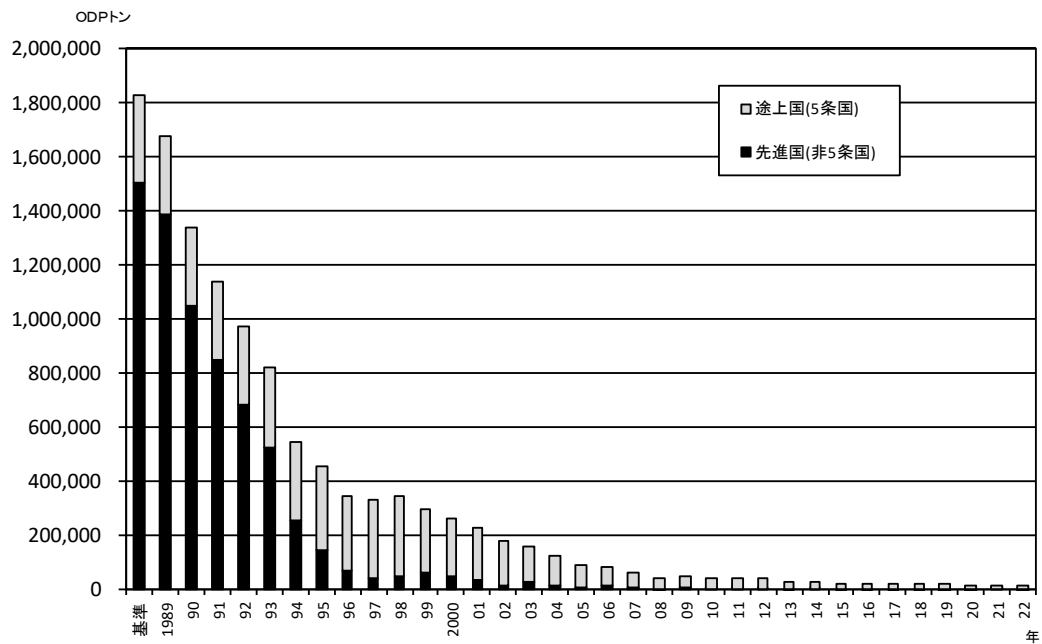


図 4-4 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の消費量の推移（1989～2022 年）
ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完（HCFC を除く）し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完（先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完）。単位は ODP トン。（出典） UNEP オゾン事務局ウェブサイト

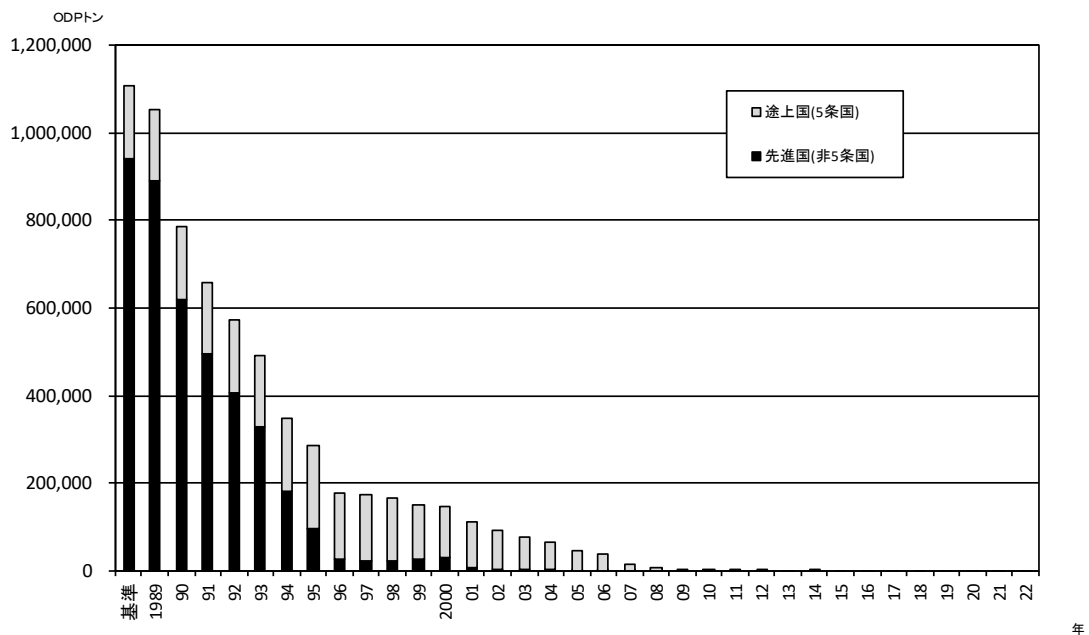


図 4-5 モントリオール議定書に基づく CFC（附属書 A グループ I）の消費量の推移（1989～2022 年）

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

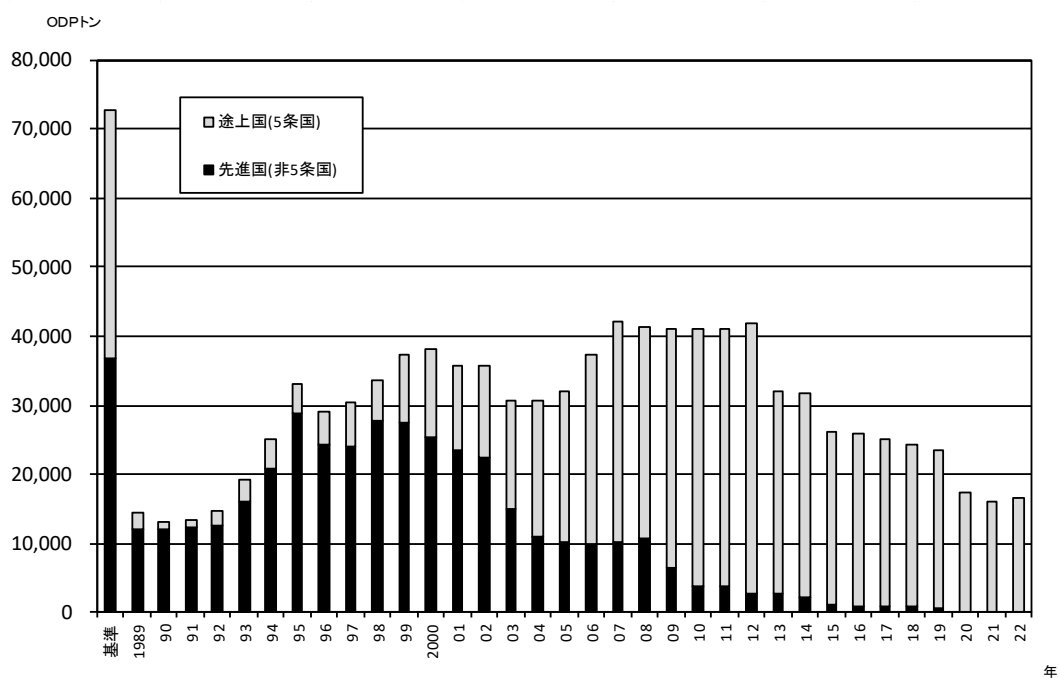


図 4-6 モントリオール議定書に基づく HCFC の消費量の推移 (1989~2022 年)

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

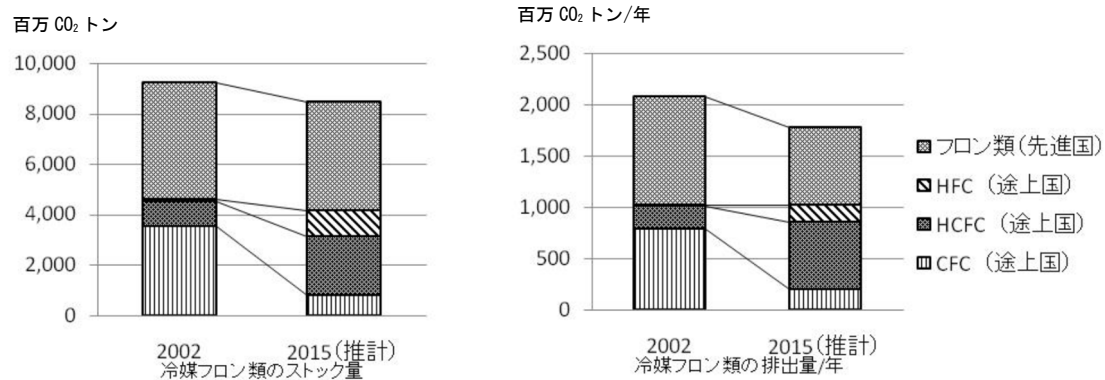


図 4-7 冷媒フロン類のストック量及び排出量/年 (2002 年・2015 年 (推計))

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用に限る。

・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
2022 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。

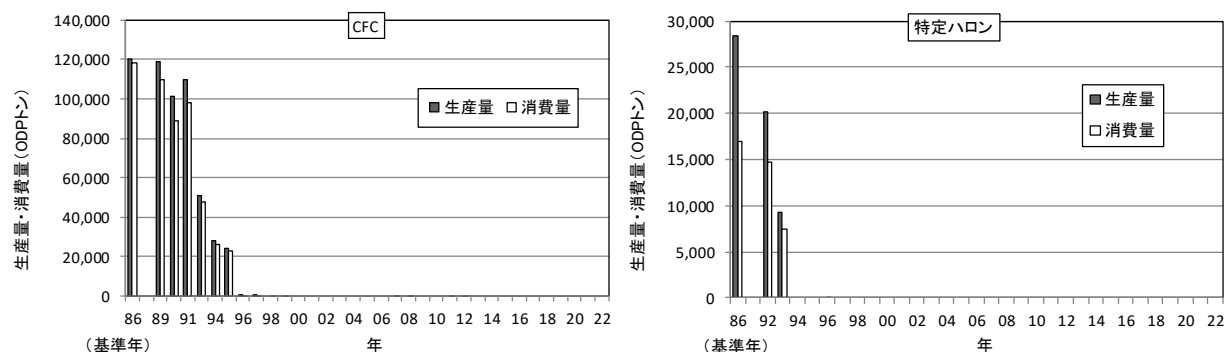


図 4-8 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 A）

（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
2022 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。

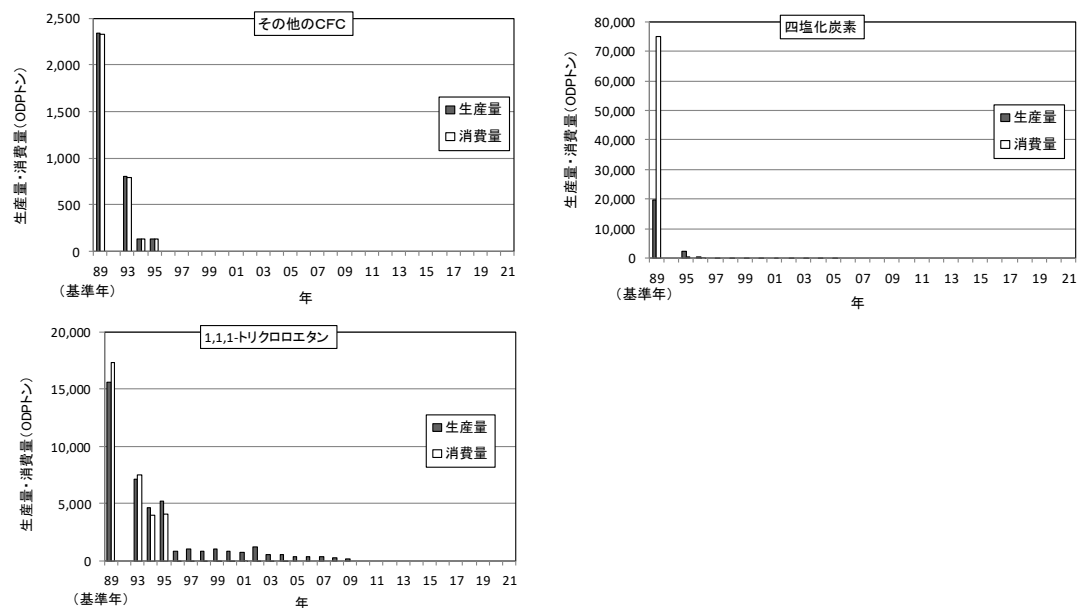


図 4-9 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 B）

（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
2022 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。

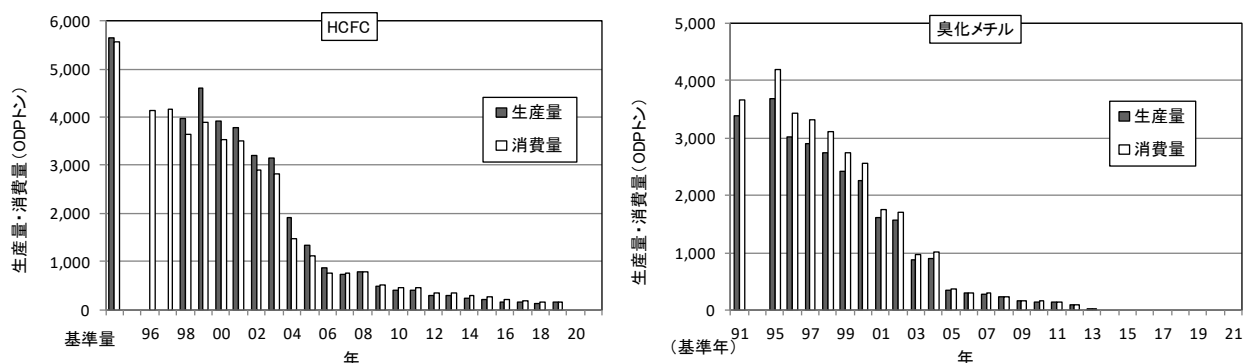


図 4-10 特定物質の生産量・消費量（議定書附属書 C、E）

（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 万トン）

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
2022 年	23,911	30,755	6,662	505

(1) 各年は 1 月から 12 月までの値となっている。

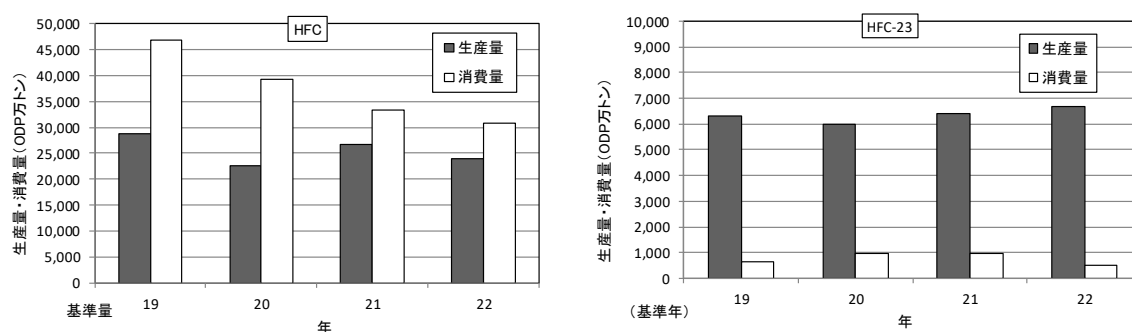


図 4-11 特定物質代替物質の生産量・消費量（議定書附属書 F）

（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	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	2021 年度
業務用 冷凍空調機器	1,230	1,368	1,394	1,538	1,526	1,522	1,552	1,743	1,511	1,553
家庭用 エアコン	2,359	2,961	2,225	2,355	2,567	2,833	3,398	3,581	3,854	3,540
家庭用 冷蔵庫冷凍庫	2,919	3,433	2,775	2,799	2,829	2,982	3,354	3,597	3,709	3,543
カーエアコン	2,816	2,835	2,904	2,741	2,702	2,972	2,967	2,935	2,779	2,678
合 計	9,324	10,597	9,298	9,433	9,624	10,309	11,269	11,856	11,853	11,315

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	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	2021 年度
業務用 冷凍空 調機器	CFC	211	175	150	165	166	119	131	110	124	89
	HCFC	3,140	2,917	2,847	3,169	3,119	2,839	2,772	2,564	2,408	2,218
	HFC	1,193	1,371	1,427	1,507	1,813	2,137	2,312	2,565	2,702	2,836
	計	4,543	4,463	4,424	4,841	5,097	5,094	5,215	5,239	5,235	5,143
家庭用 エァ コン	HCFC	1,156	1,256	1,069	934	920	940	1,035	951	878	697
	HFC	322	466	508	570	700	892	1,181	1,367	1,584	1,609
	計	1,478	1,722	1,577	1,505	1,622	1,835	2,226	2,346	2,505	2,380
家庭用 冷蔵庫 冷凍庫	CFC	97	90	72	58	50	44	45	41	36	31
	HCFC	12	13	10	8	7	7	6	6	5	4
	HFC	169	189	166	144	138	132	136	132	120	106
	計	278	291	248	210	195	183	188	172	161	142
カーエ ァコン	CFC	21	17	14	10	6	5	4	3	2	2
	HFC	792	792	773	710	682	720	718	694	625	579
	計	813	809	787	720	689	726	722	696	627	581
特定 フロン	CFC	329	282	236	233	222	168	180	153	163	91
	HCFC	4,308	4,186	3,926	4,111	4,046	3,786	3,813	3,521	3,291	2,218
	小計	4,637	4,468	4,162	4,334	4,267	3,954	3,993	3,675	3,454	2,309
代替 フロン	HFC	2,476	2,818	2,874	2,931	3,333	3,881	4,347	4,758	5,031	3,415
合計		7,112	7,285	7,036	7,275	7,601	7,835	8,340	8,433	8,485	8,171

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	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	2021 年度
業務用 冷凍空 調機器 カーエ アコン	CFC	218	181	155	190	150	123	116	93	85	97
	HCFC	2,393	2,349	2,305	2,464	2,363	2,037	1,786	1,538	1,493	1,525
	HFC	1,829	1,940	2,034	2,161	2,268	2,378	2,457	2,476	2,516	2,845
	計	4,440	4,470	4,494	4,815	4,781	4,538	4,357	4,108	4,099	4,484
家庭用 エアコン	HCFC	1,158	1,245	716	245	239	195	189	121	46	45
	HFC	322	461	325	142	179	183	218	197	185	126
	計	1,480	1,706	1,041	388	420	382	413	336	259	197
家庭用 冷蔵冷 凍庫	CFC	97	90	71	56	49	43	44	40	36	30
	HCFC	12	13	10	7	6	6	5	4	3	3
	HFC	169	186	108	40	49	38	34	35	29	24
	計	278	289	189	103	104	87	83	79	69	57
特定 フロン	CFC	315	271	226	246	199	166	160	133	121	127
	HCFC	3,563	3,607	3,031	2,716	2,608	2,238	1,980	1,663	1,542	1,573
	小計	3,878	3,878	3,257	2,962	2,807	2,404	2,140	1,796	1,663	1,700
代替 フロン	HFC	2,320	2,587	2,467	2,343	2,496	2,599	2,709	2,708	2,730	2,995
合計		6,199	6,465	5,724	5,305	5,303	5,003	4,849	4,504	4,393	4,695

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さ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。

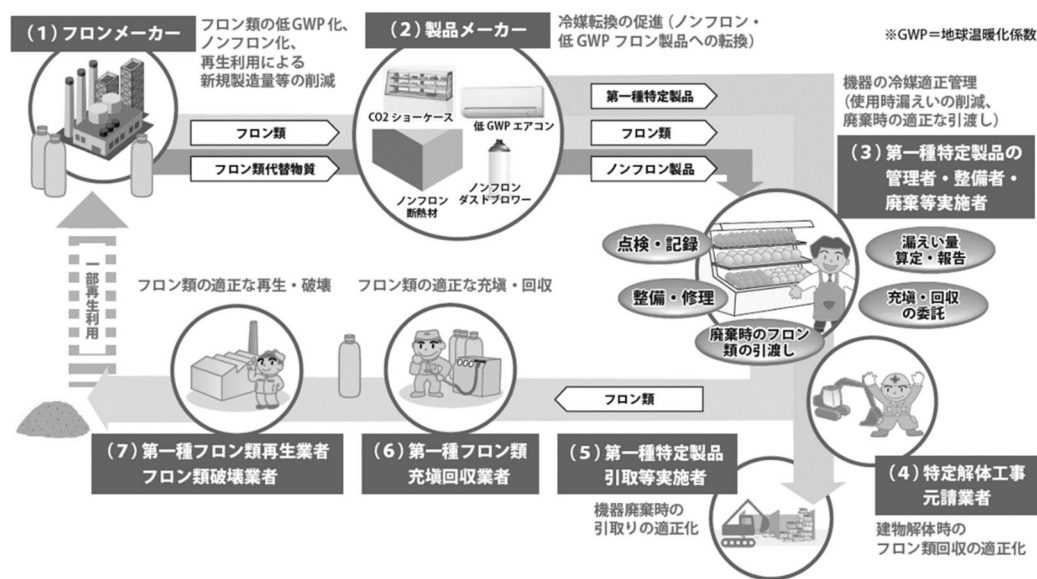


図 4-12 フロン排出抑制法の概要

(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 (2022 年(令和 4 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	29,751	15,846
	消火装置	8,101	643
	消火器	6,438	112
	小計	44,290	16,601
ハロン-2402	消火設備	242	125
	消火装置	56	8
	消火器	98	2
	小計	396	135
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		45,228	16,775

(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 4 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)	年度	供給量(トン)	回収量(トン)
1994	100	27	2008	156	146
1995	117	56	2009	89	99
1996	126	59	2010	58	161
1997	111	46	2011	46	159
1998	73	94	2012	41	196
1999	57	78	2013	91	217
2000	65	97	2014	173	179
2001	66	104	2015	192	166
2002	63	80	2016	187	172
2003	52	112	2017	164	236
2004	100	118	2018	173	191
2005	123	133	2019	170	160
2006	173	110	2020	178	187
2007	208	145	2021	130	214

(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 4 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CO2トン)****	移動量*****
CFC	CFC-11	288	1,319	0	690,479	691.798	691.8	328.6
	CFC-12	161	10,926	0	419,592	430,518	430.5	469.3
	CFC-113	284	400	0	400	800	0.6	0.5
	CFC-114	163	-	-	0	0	0.0	0.0
	CFC-115	126	0	0	639	639	0.4	0.5
	CFC-13	107	0	0	0	0	0.0	0.0
	CFC-112	263	-	-	0	0	0.0	0.0
	合計		12,645	0	1,111,110	1,123,755	1,123	799
ハロン	ハロン1211	380	-	-	0	0	0.0	0.0
	ハロン1301	382	1,820	0	13,396	15,216	152.2	10.9
	ハロン2402	211	-	-	535	535	3.2	0.1
	合計		1,820	0	13,931	15,751	155	11
HCFC	HCFC-21	177	8,400	0	8,400	16,800	0.7	0.0
	HCFC-22	104	126,535	0	1,237,226	1,363,761	75.0	246.8
	HCFC-123	164	24,961	0	79,675	104,636	2.1	0.8
	HCFC-124	105	1,500	0	1,500	3,000	0.1	0.2
	HCFC-133	106	15,000	0	15,000	30,000	1.8	0.0
	HCFC-141b	176	65	0	836,826	836,891	92.1	60.7
	HCFC-142b	103	10,007	0	296,717	306,724	19.9	70.9
	HCFC-225	185	55,115	0	70,198	125,313	8.8	4.5
	合計		241,583	0	2,545,542	2,787,125	200	384
四塩化炭素		149	1,009	338	1,358	2,705	3.0	0.4
1,1,1-トリクロロエタン		279	490	19,676	20,166	40,332	4.0	0.6
臭化メチル		386	107,960	0	545,795	653,755	392.3	0.3
合計			365,507	20,014	4,237,902	4,623,423	1,878	1,195

* 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

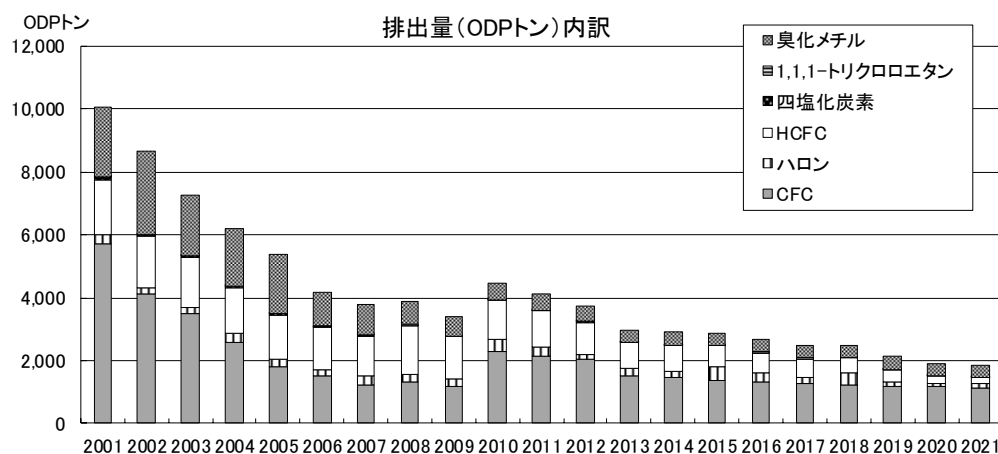


図 4-13 PRTR に基づくオゾン層破壊物質の排出量 (ODP 換算)

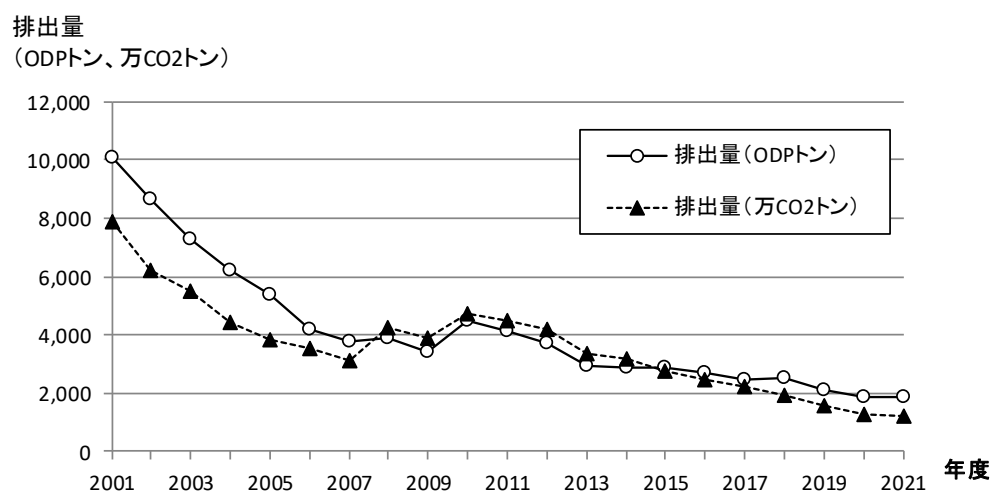


図 4-14 PRTR に基づくオゾン層破壊物質の排出量 (ODP 換算、CO₂ 換算)

(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」(令和 3 年 10 月 22 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 44%減の水準(約 21.8 百万トン-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)

	2013 年 実績	2019 年 実績	2030 年の 排出量の目標
代替フロン等 4 ガス	39.1	55.4	21.8
HFCs	32.1	49.7	14.5
PFCs	3.3	3.4	4.2
SF ₆	2.1	2.0	2.7
NF ₃	1.6	0.26	0.5

(出典)「地球温暖化対策計画」 令和 3 年 10 月 22 日閣議決定

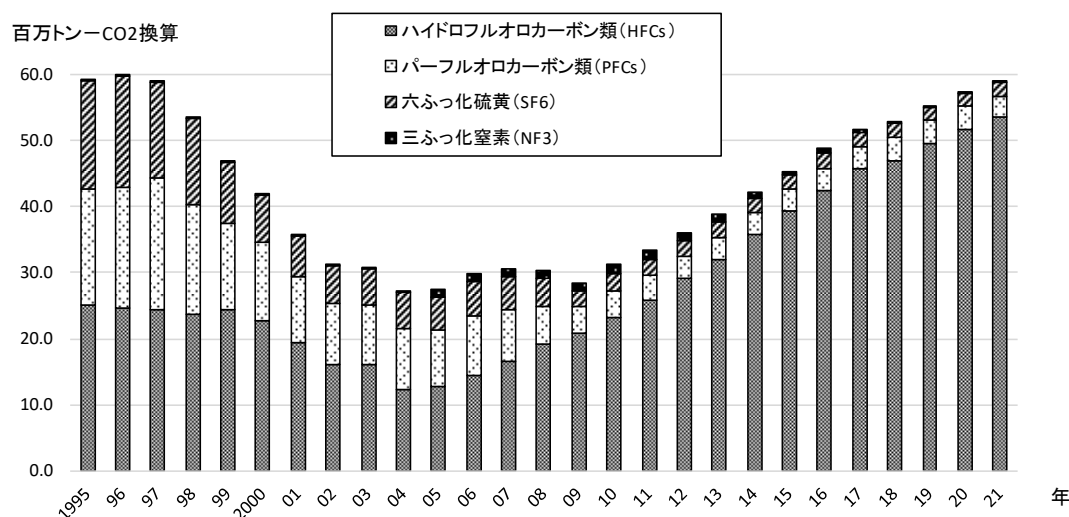


図 4-15 代替フロン等 4 ガスの排出量の推移(ガス別)

(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）

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) (p.21) 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。*

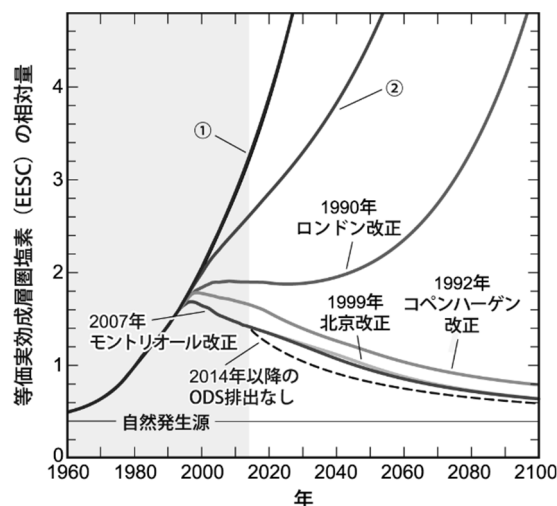


図4-16 モントリオール議定書のEESCの削減効果

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) 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。

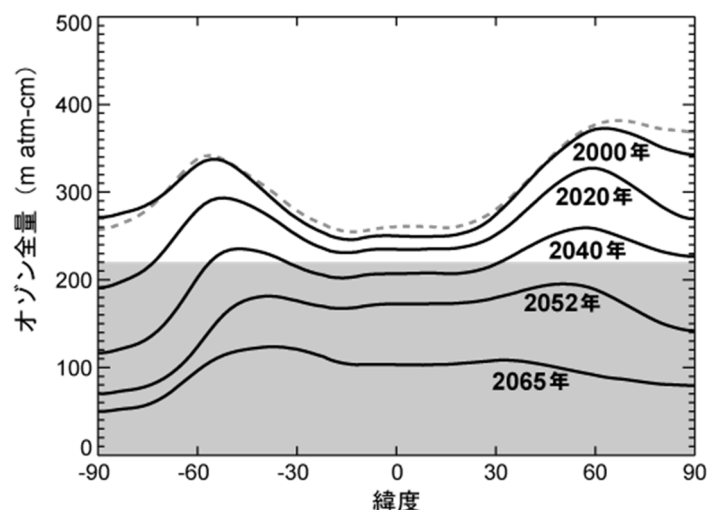


図 4-17 モントリオール議定書によるオゾン層の保護効果

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

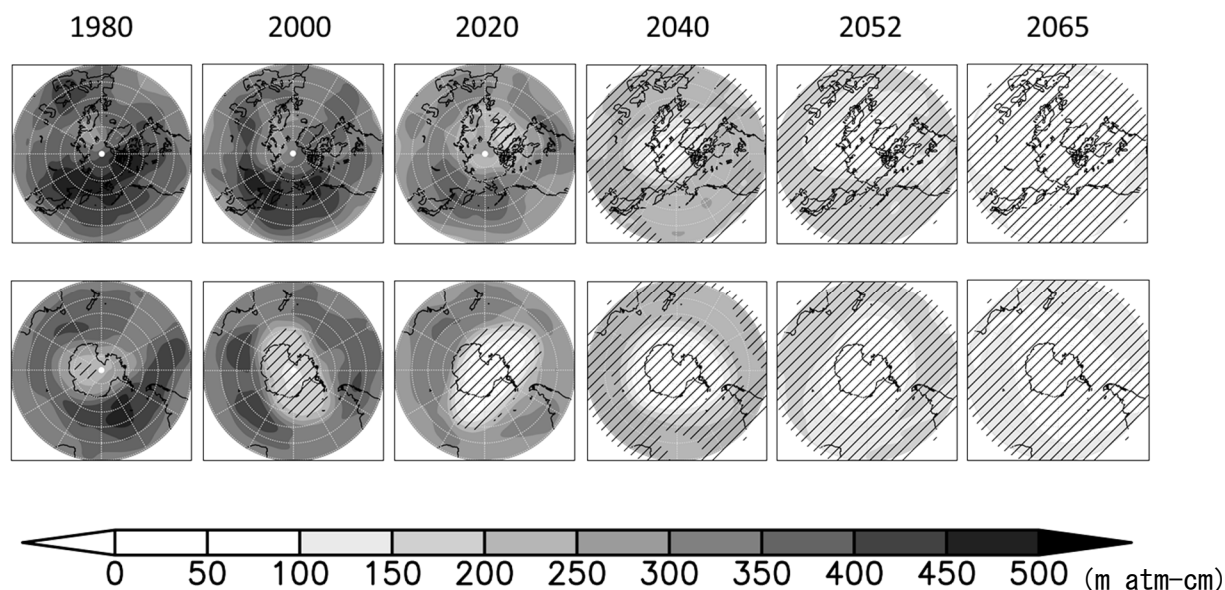


図 4-18 北半球中高緯度（上）および南半球中高緯度（下）のオゾン全量分布の経年変化

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 $\text{m atm}\cdot\text{cm}$ 。オゾン全量が $220 \text{ m atm}\cdot\text{cm}$ 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。

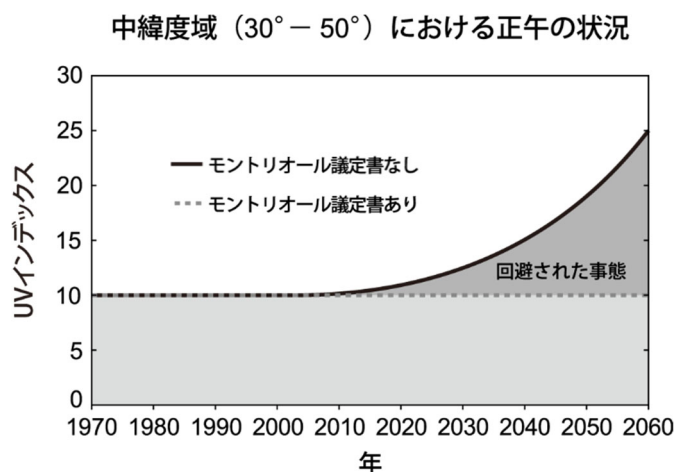


図 4-19 北半球中緯度帯の UV インデックスの予測（仮定）

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。

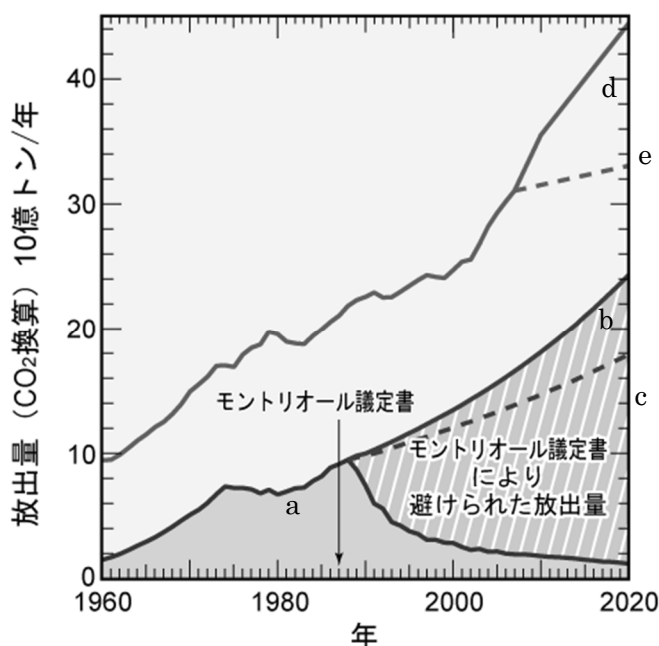


図 4-20 地球温暖化係数で重み付けした放出量（CO₂換算）

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。

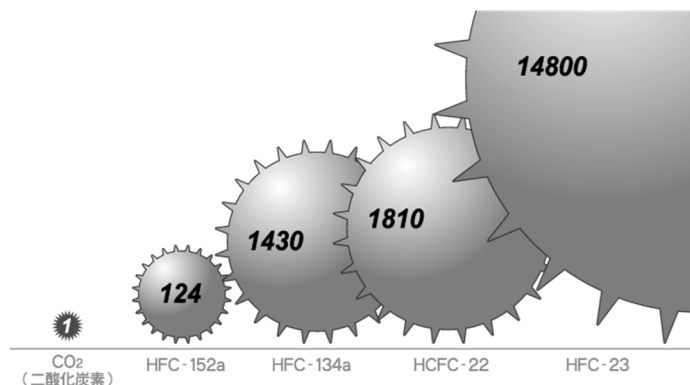


図 4-21 HFC の地球温暖化係数

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。

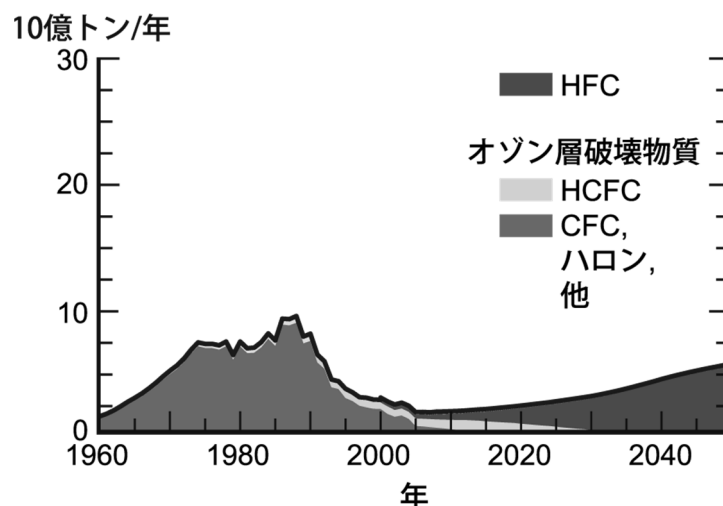


図 4-22 地球温暖化係数で重み付けした HFC の放出量予測

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(2022年)*

オゾン層破壊の科学アセスメント：2022 Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022

総括要旨 Executive Summary

科学は、モントリオール議定書の成功の礎の一つとなってきた。本書は、2018年のオゾン層破壊の科学アセスメント以降の、オゾン層破壊に関する科学的理解の進歩と最新情報を取り上げ、現在の課題と将来の政策選択に資する科学的情報を提供するものである。

A. モントリオール議定書の主な成果

- モントリオール議定書に基づいた行動により、規制対象のオゾン層破壊物質（ODSs）の大気中存在量は引き続き減少し、成層圏オゾン層の回復が進んでいる。長寿命 ODSs に起因する対流圏の塩素及び臭素の総量は、ともに 2018 年のアセスメント以降減少し続けている（図）。新しい研究は、モントリオール議定書の遵守による ODS 排出量の減少により、ODSs が規制なしで年間 3～3.5% 増加する極端なシナリオと比較して、今世紀半ばまでに約 0.5～1℃ の地球温暖化を回避するという前号のアセスメントを支持している。
- モントリオール議定書に基づいた行動は引き続きオゾンの回復に貢献しており、上部成層圏のオゾンの回復が進んでいる。南極のオゾン全量は、オゾンホール大きさ、強さ及び出現期間にかなりの年々変動があるものの回復し続けている。南極域以外（北緯 90 度～南緯 60 度）では、1996 年以降のオゾン全量の回復を示す証拠は限られており、その確信度は低い。オゾン全量は、南極では 2066 年頃、北極では 2045 年頃、高緯度を除く全球の平均（北緯 60 度～南緯 60 度）では 2040 年頃に 1980 年の値に戻ると予想されている。1980 年から 1996 年までの世界各地におけるオゾン全量の減少に関する評価は、2018 年のアセスメントから基本的に変わっていない。
- 一部のハイドロフルオロカーボン類（HFCs）の生産と消費の段階的削減を求めるモントリオール議定書の 2016 年キガリ改正を遵守することで、2100 年までに 0.3～0.5℃ の温暖化を回避できると推定されている。なお、この推定には HFC-23 の排出からの寄与は含まれていない。

*（出典）気象庁ホームページ「オゾン層破壊の科学アセスメント 2022：総括要旨の和訳」より引用

B. 現在の科学的及び政策上の課題

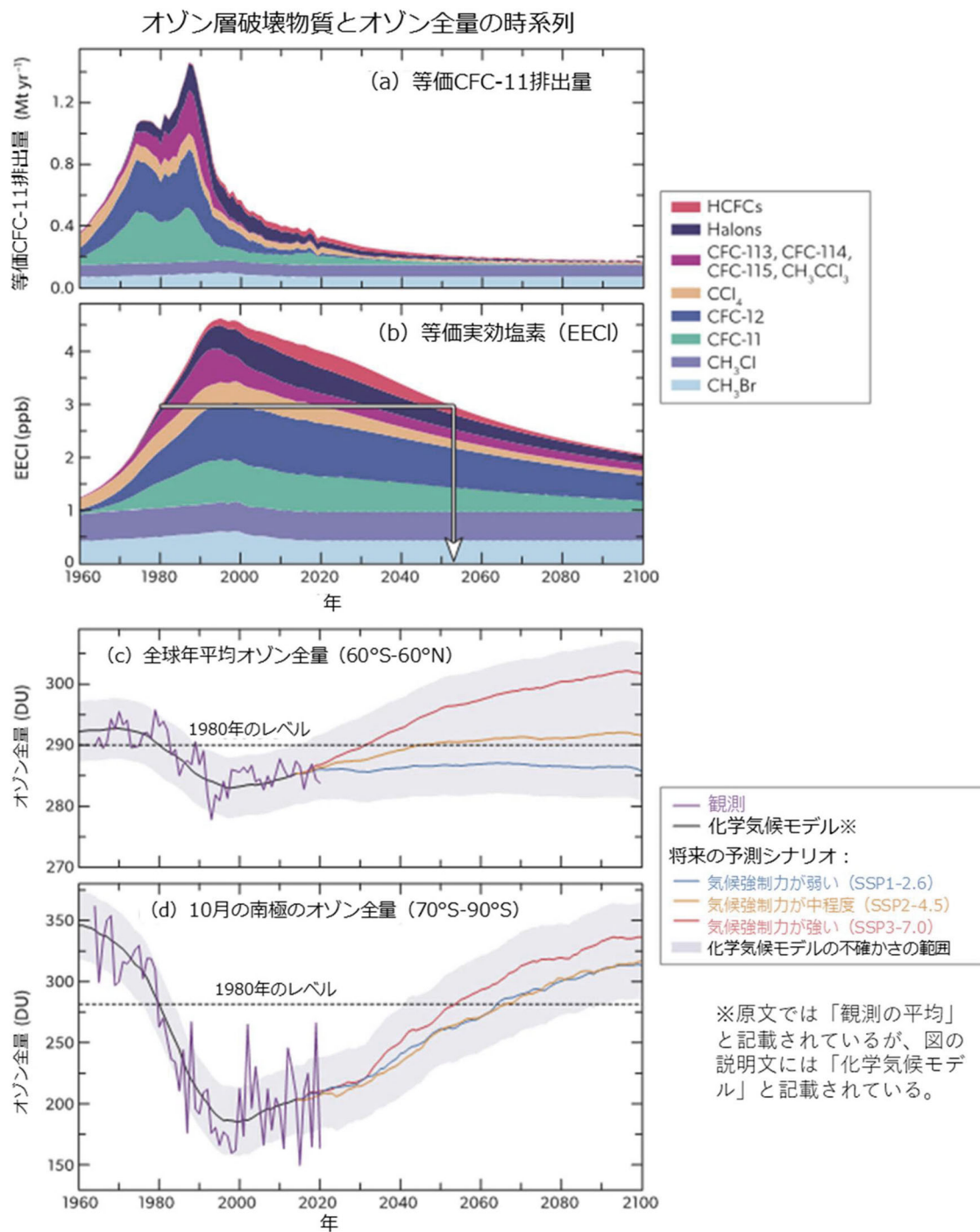
- 近年、CFC-11 の想定外の排出が確認され、科学的調査及び政策的対応が行われた。観測と分析により、これらの排出量の少なくとも半分について発生地域が明らかになり、その後大幅な排出量削減が行われた。また、地域的なデータからは、CFC-12 の排出の一部がこの未報告の CFC-11 の生産と関連していた可能性が示唆されている。なお、バンク¹や観測網の空白域からの排出量の不確実性が大きすぎるため、想定外の排出が全て停止したかどうかを判断することはできない。
- 他の ODSs (CFCs-13、112a、113a、114a、115、及び CCl₄) や HFC-23 についても原因不明の排出が確認されている。これらの一部は、原料又は副産物の漏出により発生している可能性が高いが、残りは解明されていない。
- 極域以外の上部成層圏のオゾンが回復し続けていることは観測とモデルで一致している。これとは対照的に、下部成層圏のオゾンは回復の兆しがみられない。モデルによる再現実験では、両半球中緯度の下部成層圏のオゾンがわずかに回復しているが、これは観測ではみられない。この矛盾を解決することが、オゾンの回復を正しく理解するための鍵となる。
- 既存の大気監視網では、人為起源の排出に起因する長寿命 ODSs 及び HFCs の全球の地表面濃度を測定している。しかし、監視網には地域的な空白域があるため、多くの排出源地域からの規制物質の排出を特定・定量化するには限界がある。
- オゾンに関連した大気成分（反応性塩素、水蒸気、長寿命の輸送トレーサーなど）について、全球の鉛直分布を観測している衛星搭載機器のいくつかは、数年以内に退役となる予定である。これらの機器が更新されなければ、将来、成層圏オゾン層の変化を監視し説明する能力が妨げられることになるだろう。
- 地球温暖化を相殺する可能性のある選択肢として提案されている、成層圏エーロゾル注入 (SAI) のオゾン層への影響について、2022 年科学評価パネル (SAP) アセスメントレポートの付託事項に従って評価されている。南極オゾンホールの深化やオゾン回復の遅延など、重要な潜在的影響が確認された。多くの知識不足及び不確実性があるため、現時点ではより確実な評価を行うことができない。
- 以下について、21 世紀のオゾンへの影響に関する懸念が高まっている。
 - ・一酸化二窒素 (N₂O)、メタン (CH₄)、及び CO₂ 濃度のさらなる増加
 - ・ODS 及び HFC 原料の使用と排出の急速な拡大
 - ・熱帯地域におけるオゾン全量に関連した気候変動

¹ODSs を使用した既製品として、使用・貯蔵されているもの。

- ・大規模な山火事と火山噴火
- ・民間ロケットの打ち上げ頻度の増加及び商用超音速航空機の新機種による排出

C. 今後の政策上の検討事項

- 仮に、現在推定されている ODS 原料の排出が将来的になくなれば、中緯度の等価実効成層圏塩素 (EESC) が 1980 年の量に戻るのを、主に CCl_4 の削減により 4 年近く早めることができ、ODSs による気候強制力を軽減することができるだろう。
- モントリオール議定書で、検疫用途及び出荷前の処理であれば利用が認められている臭化メチル (CH_3Br) の将来の排出をなくすと、中緯度の EESC が 1980 年の量に戻るのが 2 年早まるだろう (前号のアセスメントの記述のとおり)。
- ジクロロメタン (CH_2Cl_2) に代表される人為起源の非常に短寿命な塩素物質の排出量は増え続け、オゾン破壊の一因となっている。 CH_2Cl_2 の排出が現在のレベルで継続すると、世界のオゾン全量を年平均で約 1DU 減少させ続けることになる。これらの排出がなくなれば、オゾン全量の減少は急速に改善されるだろう。
- 2023 年から 2070 年までの平均で、人為起源の N_2O 排出量を 3%削減すると、同期間の世界の年平均オゾン全量は約 0.5DU 増加し、放射強制力は 2023 年から 2100 年までの平均で約 0.04Wm^{-2} 減少するだろう。
- 長寿命である HFC-23 は、大部分が HCFC-22 生産の副産物であり、世界の排出量は予想の 8 倍もある。HCFC-22 製造の際の HFC-23 排出削減が進むか、HCFC-22 の原料利用が減らない限り、HFC-23 は増加する可能性が高い。
- 現在、クロロフルオロカーボン類 (CFCs) とハイドロクロロフルオロカーボン類 (HCFCs) を合わせた地球温暖化係数 (GWP) 加重排出量は、HFCs の加重排出量と同程度である。CFCs と HCFCs の将来の排出量を削減するためには、化合物に応じて、バンクからの放出、継続的な生産や原料用途として許可された使用、副産物としての使用、又は未知の用途での使用に対処する必要がある。



図：オゾン層破壊物質とオゾン全量の時系列

- (a) 等価 CFC-11 排出量 (各物質のオゾン破壊効率を CFC-11 に換算した排出量)
- (b) 等価実効塩素 (EECI) の濃度 (各物質の地表面での大気中濃度、塩素及び臭素の原子数と相対的なオゾン破壊効率を考慮した濃度)
- (c) 全球の年平均オゾン全量 (60° S-60° N)
- (d) 10 月 (春季) の南極のオゾン全量 (70° S-90° S)

3. UNEP 環境影響評価パネル報告書要旨(2022 年)*

成層圏オゾン層破壊、紫外線、気候変化と環境影響の相互作用：2022 アセスメント
Environmental Effects of Stratospheric Ozone Depletion, UV Radiation, and
Interactions with Climate Change: 2022 Assessment Report

総括要旨 Executive Summary

1 序論

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とその修正および調整（以下、「モントリオール議定書」と呼ぶ）は、成層圏オゾン層を保護し、地球表面での太陽 UV-B 紫外線（UV-B、波長 280～315nm）の地球規模の増加を防ぐのに非常に効果的であることが証明されている。キガリ修正条約を含むこの国際条約は、地球温暖化を緩和するためにこれまでに取られた最も重要な社会的行動の 1 つだ。なぜなら、モントリオール議定書によって規制されているオゾン層破壊物質（ODS）とその代替物質の多くは強力な温室効果ガス（GHG）でもあるからだ。南極のオゾンホールは南半球の気候変化に寄与しており、この気候変化により人間、他の動物、植物、素材の UV-B および UV-A 紫外線（315～400 nm）への曝露が変化している。このように、成層圏のオゾン、紫外線、気候の変化はさまざまな形で密接に関連しており、人間の健康や環境に影響を与える可能性がある。

この総括要旨では、国連環境計画（UNEP）に基づくモントリオール議定書（EEAP; Box 1）の環境影響評価パネルによる 2022 年の 4 カ年アセスメントからの主要な結果を示し要約する。2022 年環境影響評価パネルによる 4 カ年アセスメントは、2018 年の 4 カ年アセスメント以来の最新で包括的なアセスメントである。（<https://ozone.unep.org/science/assessment/eeap> で入手可能。また、科学者向けには Photochemical & Photobiological Sciences 18, 595-828 も参照されたい。現在の評価では、モントリオール議定書締約国の付託事項（Box 1）に従って、成層圏オゾン層、太陽紫外線、気候の変化が人間の健康、陸上および水圏生態系、生物地球化学的循環、大気質、素材、マイクロプラスチックに及ぼす相互作用的な環境影響を取り上げている。さらに、太陽紫外線、モントリオール議定書、およびコロナウイルス（COVID-19）パンデミックの間の関連性を評価する。

Box 1. UNEP 環境影響評価パネル（EEAP）とその付託事項

- EEAP は、成層圏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立された 3 つの評価パネルのうちの 1 つである（<https://ozone.unep.org/science/overview>）。EEAP は、成層圏のオゾン層破壊、紫外線、気候変動との相互作用が、人の健康、水圏および陸上生態系、生物地球化学的循環（例えば、生物圏や大気圏の中での炭素やその他の元素の移動や変換など）、大気質、建設及びその他の用途の資材へ及ぼす広範囲で潜在的影響を考慮している。
- モントリオール議定書締約国会議決定 XXXI/2 による EEAP の付託条件は以下のとおりである。
- モントリオール議定書の締約国は、環境影響評価パネルに対し、2022 年の報告書の起草において、特に最新の科学情報に注意を払い、将来の予測やシナリオを加えて、オゾン層や紫外線の変化の影響、およびそれらの気候システムとの相互作用による影響、規制物質の分解生成物やその代替物質によ

* 環境省による仮訳

る影響を評価するよう要請する。

1. 生物圏、生物多様性、生態系の健全性（生物地球化学プロセスや地球規模の循環を含む）
2. 人間の健康;
3. 生態系サービス、農業、建設資材、輸送資材、太陽光発電用の資材、および環境に優しいマイクロプラスチックの生成。

ここに要約されている 2022 年の 4 ヶ年アセスメントの結果は、モントリオール議定書が人間の健康を維持し、陸域と水域における健全で多様な生態系を維持する上で重要な役割を果たし続けていることを示している。新たな知見は、モントリオール議定書がなければ発生したであろう極端なレベルの太陽 UV-B 紫外線が人間の健康と生態系の生産性に及ぼす悪影響を精緻化し定量的に示している。しかし、現在オゾン層破壊が顕著でない地球上の地域（極地以外）では、太陽 UV-B 紫外線のレベルによっては、それが有益な効果をもたらす可能性があることも分かっている。たとえば、有益な効果には、人間の健康、作物の活力と害虫や病原体に対する防御、食糧の質、地表水の殺菌、環境毒素や汚染物質の分解などの重要な生態系サービスに対する効果が考えられる。生物、生態系、素材への紫外線暴露量の変化には、気候変動がますます重要な役割を果たしているという証拠が増え続けている。紫外線への曝露量の変化は、極端な気候事例²、雲量、エアロゾル、雪氷被覆、海洋水の混合、種の分布、成長と発達の季節的パターン（季節学）、および人間の行動の変化によって生じている。

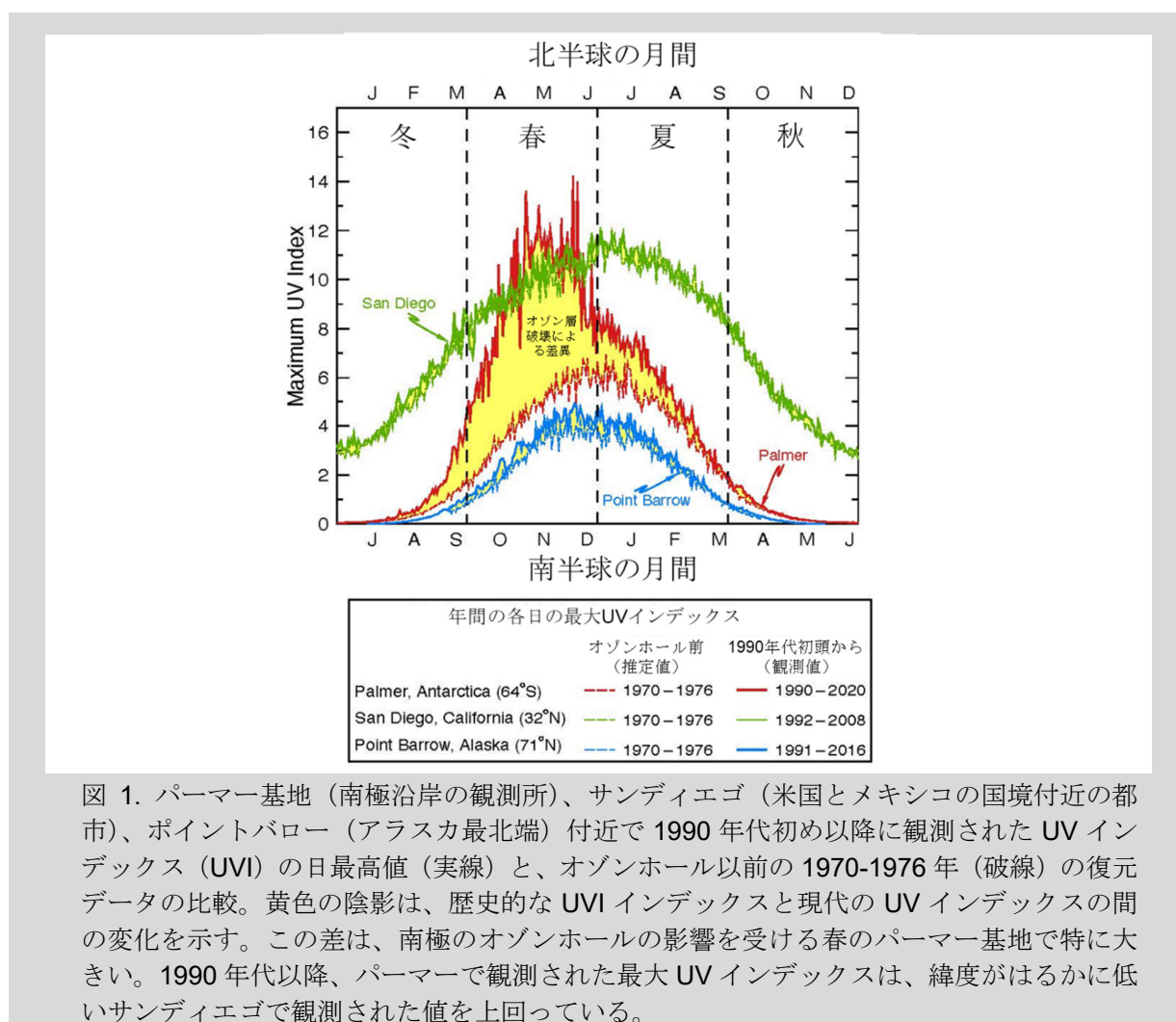
2 紫外線と気候変化

モントリオール議定書は、成層圏のオゾン層と気候を保護し、地表面の UV-B 放射の大幅な増加を防ぐ上で重要な役割を果たし続けている。南極のオゾンホールの下では UV-B 放射強度が高いままだが、過去数十年間の極地外の UV-B 紫外線の変化は小さい。しかし、大気中の温室効果ガス (GHG) の増加による気候の変化により、成層圏のオゾンと UV-B 紫外線の大幅な年次変動が生じている。毎年大きなばらつきがあるにもかかわらず、今世紀半ばまでに南極のオゾンホールが回復すると予測されている。今後の成層圏オゾンと極域外の UV-B 放射程度の変化は小さくなると予想されている。極地、特に南極上空の成層圏オゾンの近年の異常な変化は、南半球における熱波や山火事などの極端な現象の一因となっている可能性がある。これらの極端な現象に伴う UV-B 紫外線の上昇は、特に気候が変化し続ける中で、極地の生物や生態系に重大な影響を与える可能性がある。

2 極端な気象事例は、「統計的に稀な、あるいは異常な気候の周期が、生態系の構造や機能を、典型的な、あるいは通常の変動と考えられている範囲から大きく逸脱して変化させる現象」と定義されている。同様に、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) によれば、「ある変数の値が閾値を上回る（又は下回る）場合」である。複合的な極端現象とは、「社会的または環境的リスクに寄与する複数の要因および/または危険な組み合わせ」である。複合的な極端現象の例としては、高温、乾燥、風の強い条件が組み合わさった火災気象条件が挙げられる。

主な調査結果

- ・ 前回の 4 ヶ年アセスメント以降に発表されたほぼすべての研究で、極域外の地球表面における生物学的に有効な紫外線の変化は、過去 25 年間で小さく（10 年あたり 4%未満）なっていることが確認されている。一部の地域では UV インデックス（UVI³）がわずかに増加したが、他の地域ではわずかに減少した。過去 20-30 年の間、極地以外の紅斑紫外線放射の変化は、全オゾン量の長期傾向ではなく、雲、エアロゾル、表面反射率（通常は雪や氷で覆われている地域）の変化によって主に解釈されていた。
- ・ 南極のオゾンホールのため、地表面の UV-B 放射が大幅に増加し、ピーク放射強度は亜熱帯地域で観測されたものを超えることがある。最新の分析結果は、南極のオゾンホールが南極大陸のパーマー基地（南緯 64°）の UV インデックスを通年で大きく上昇させ、春（9 月 15 日～11 月 15 日）に最も大きく上昇させるという従来の結論を裏付けるものであった（図 1）。1990 年代初頭からこの地点で観測されている春の最大 UV インデックスは、オゾンホール以前（1970～1976 年）の 2.5 倍で、亜熱帯地域（カリフォルニア州サンディエゴ、北緯 32 度など）で観測された値を上回ることもある。1990 年から 2020 年の夏と秋（12 月 21 日～6 月 21 日、オゾンホールがない時期）にかけて観測された UV インデックスの最大値は、1976 年以前に推定された最大値を 20%上回った。



3 UV インデックスとは、日焼け（皮膚が赤くなること、医学的には紅斑と呼ばれる）を引き起こす紫外線放射強度を観測したものである。

- ・近年、極地における UV インデックスの大きな年ごとの変動が観察されている。例えば、2019 年春の UV インデックスは、南極点では過去（1991～2018 年）の範囲の最小値であったが、2020 年春には、過去平均を最大 80% 上回る過去最高値に近い値が観測された（図 2）。2020 年に南極のオゾンホールが持続した結果、若い動物が生まれたり孵化したりする晩春や、植物が活発に成長する時期に UV インデックスが急上昇した（図 2 の赤矢印）。地球温暖化の進行により、覆われた雪が失われると、この地域の生物に対する春の高い紫外線放射強度の悪影響がさらに悪化する可能性がある。

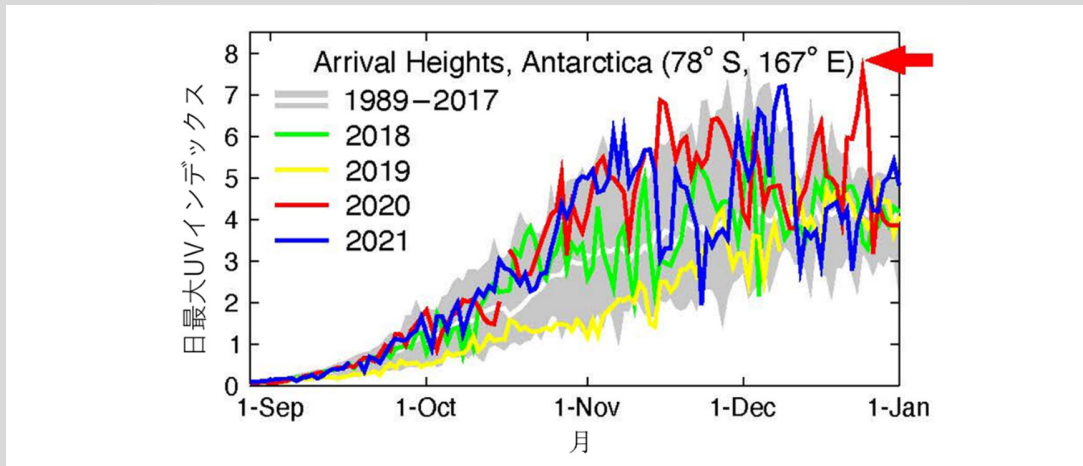


図 2. 2018 年（緑）、2019 年（黄）、2020 年（赤）、2021 年（青）に南極の Arrival Heights で観測された日最大紫外線指数（UVI）と、凡例に示した年の日最大観測値の平均値（白線）および範囲（灰色の網掛け）との比較。

UVI インデックスは、SUV-100 分光放射計で観測されたスペクトルから計算。2009 年までは、この機器は NSF UV モニタリングネットワークの一部であり、現在は米国海洋大気庁南極 UV モニタリングネットワーク (<https://gml.noaa.gov/grad/antuv/>) の中心となっている。一貫したデータ処理方法がすべての年に適用された。

- ・南極における最近の温暖化と広範な熱波現象は、植物や動物の UV-B 紫外線への曝露を増加させ、この地域の生態系を破壊させている可能性がある。前回のアセスメント以来、南極では 2 つの広範な熱波現象が発生した。最初の現象は 2019 年から 2020 年の夏に大陸周辺で気温記録が破られたときに発生した。2 回目は 2022 年 3 月（南半球の秋）に、暖かく湿った空気のブルームが南極高原に移動した際に、平年（ -48.6°C ）より約 40°C 高い極端な気温が報告された。このような熱波は、雪や氷の融解を加速させ、これまで保護されていた春の強い UV-B 紫外線に植物をさらす可能性がある。南極半島の気温の上昇により、氷のない地域も広がり、維管束植物の生息地が拡大し、新しい動植物種が大陸に侵入する可能性が高まっている。
- ・北極では、2020 年 3 月と 4 月に記録上最高の UV-B 放射強度が観測された。2020 年 3 月のカナダ北極域の月平均 UV インデックスは、過去（2005 年から 2019 年）の平均より最大 70% 高く、多くの場合、この平均を 3 標準偏差上回っていた。この時期、ほとんどの北極圏の生物は雪と海氷に守られているため、このような高い UV-B 放射強度にさらされることはなかった可能性が高い。しかし、気候変化による積雪や海氷の変化により、オゾン層破壊が顕著になるような現象が将来も続くようであれば、これらの生物は高 UV-B 紫外線にさらされる可能性がある。
- ・北極における最近のオゾン層破壊は、この地域の異常気象と海氷の融解に関連している。2020

年初頭にシベリア北極圏で発生した熱波の条件は、2020 年の強いオゾン層破壊の影響を受けた大気循環パターンに助けられたようだ。2020 年 3 月のオゾン層破壊は、シベリアと国境を接する北極海の海水の減少にも寄与した可能性がある。

- ・モントリオール議定書は、地表面の UV-B 放射の大幅な増加を防ぎ、高緯度が最大の恩恵を受けている。モデリング研究によると、モントリオール議定書がなければ、北緯と南緯 50°未満の UV インデックスは 1996 年から 2020 年の間に 10～20%上昇したであろうことが示されている。南緯 50°を超える緯度では、南米の南端で UV インデックスが 25%増加し、南極点では春に 100%以上増加したことになる（図 3）。

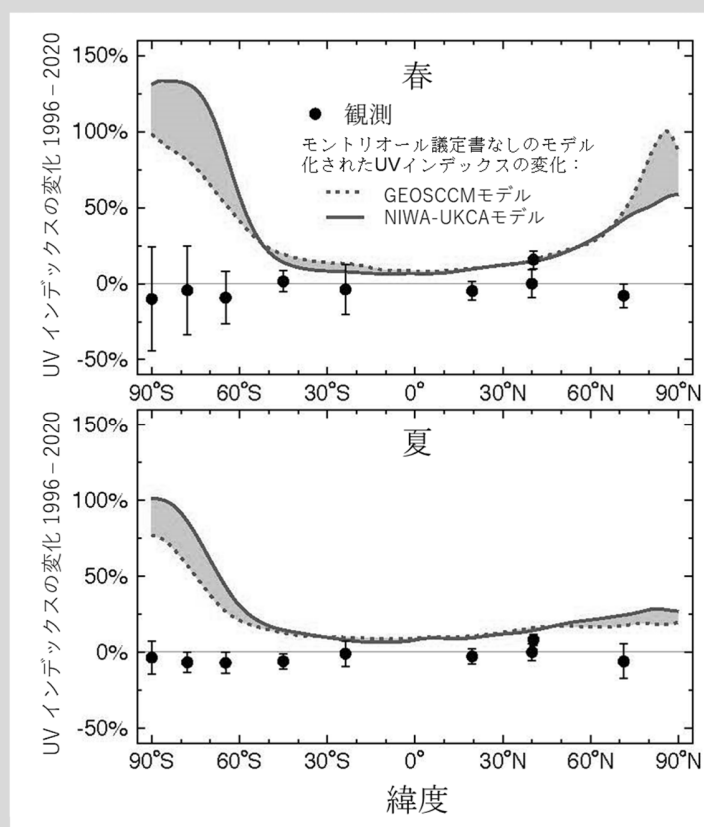


図3.夏と春における1996年から2020年までのUVインデックスの相対的变化の比較。9つの地上観測地点の観測結果（黒の記号）と2つの化学気候モデルの結果（黒線）から算出。どちらの気候モデルも、モントリオール議定書によってオゾン層破壊物質の排出が規制されない「回避された世界」シナリオを想定している。灰色の網掛けは、これらのモデル予測の範囲を示している。地上観測地点には、南極点（南緯90度）、アライバル・ハイツ（南緯78度）、パーマー基地（南緯65度）、ローダー（南緯45度）、アリス・スプリングス（南緯24度）、マウナ・ロア（北緯20度）、ボルダー（北緯40度）、テッサロニキ（北緯41度）、バロー（北緯71度）などがある。1996年から2020年までのデータがほぼ完全に記録されている地上観測地点は、実践の記号で示されているエラーバーは、回帰モデルの95%信頼区間を示す。

- ・地表の紫外線は、2090年までに中緯度地域では2～6%減少し、熱帯地域では3%未満の変動にとどまると予想される。モントリオール議定書を完全に遵守し、大気中のエアロゾル濃度が一定であると仮定した場合、モデリングによると、中緯度（30～60°）のUVインデックスは、オゾン層の回復により、2015年から2090年の間に北半球で2～5%、南半球で4～6%減少する。この期間における熱帯地方のUVインデックスの変化は3%未満と推定されている。
- ・モントリオール議定書は、地球温暖化の緩和に直接貢献してきた。モントリオール議定書で規制されている物質のほとんどは強力な温室効果ガスでもあるため、これらの物質の段階的廃止により、中緯度地域では0.5～1.0℃、北極圏では1.0℃以上の温暖化を防いだ可能性がある。いくつかの研

究によると、ODS は 20 世紀後半の気候による北極海の氷の減少（半分程度）に寄与した可能性が高いが、これらの推定には大きな不確実性が伴う。

- ・モントリオール議定書は、地球規模の植生の炭素吸収源を保護することにより、間接的に気候変動を緩和している。ODS の生産がモントリオール議定書によって規制されていなければ、植物への有害な影響を加味した実効 UV-B 紫外線は、21 世紀の間に約 5 倍に増加していた可能性がある⁴。この極端の UV-B 紫外線にさらされた植物は光合成と成長が低下し、その結果、今世紀末までに陸上植生に保持される炭素量が推定で 3,250 から 6,900 億トン減少すると考えられる。この炭素隔離の減少により、大気中にさらに 115~235ppm の二酸化炭素 (CO₂) が増加し、地球平均表面温度がさらに 0.5~1.0℃上昇したと考えられる (図 4)。

4 ここで議論されているシナリオのような「回避された世界」のシナリオは、必然的に現在の知識の状態に基づく推定値にすぎない。将来、UV 放射強度の大きな変化とその影響が明らかになったときに起こりうる人間の行動や政策の変化を考慮することはできない。とはいえ、これらの予測によって、モントリオール議定書が今日までにもたらした重要な利益を整理することができる。

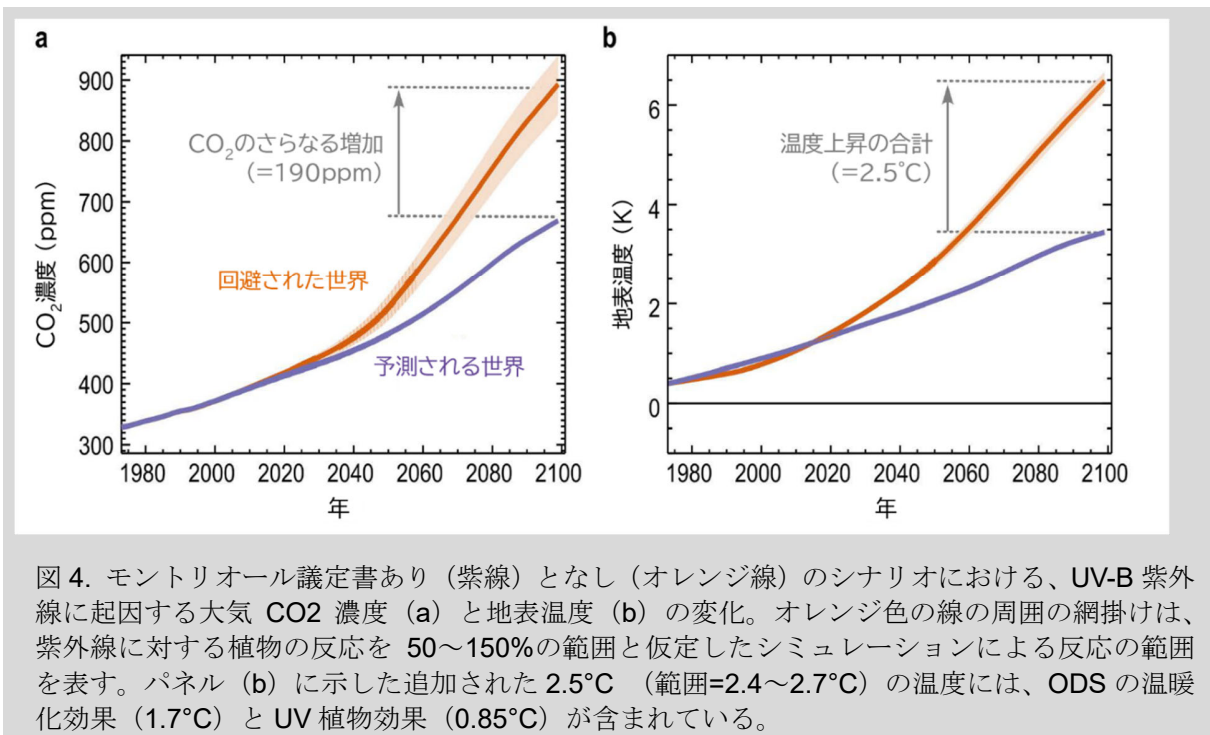


図 4. モントリオール議定書あり（紫線）となし（オレンジ線）のシナリオにおける、UV-B 紫外線に起因する大気 CO₂ 濃度 (a) と地表温度 (b) の変化。オレンジ色の線の周囲の網掛けは、紫外線に対する植物の反応を 50~150% の範囲と仮定したシミュレーションによる反応の範囲を表す。パネル (b) に示した追加された 2.5℃（範囲=2.4~2.7℃）の温度には、ODS の温暖化効果（1.7℃）と UV 植物効果（0.85℃）が含まれている。

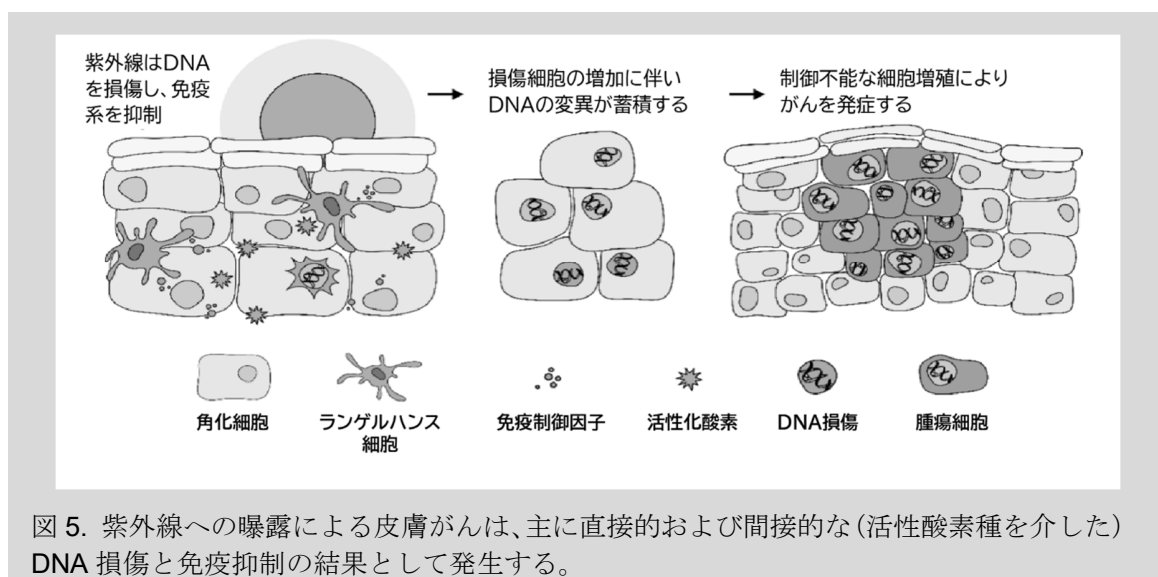
3 人間の健康

過剰な紫外線にさらされると、皮膚がん (図 5) や白内障など、人間の健康に多くの悪影響が生じる可能性がある。しかし、モントリオール議定書のおかげで、これらの病気の数百万件が回避されたと推定されている。紫外線への適度な曝露は、人間の健康、特にビタミン D の生成に有益な影響を与える。おそらく、モントリオール議定書は、UV-B 紫外線の大幅な増加を避けることで、人間が屋外で安全に過ごすことを可能にし、その結果、日光への曝露の恩恵を得ることを可能にしたと考えられる。これにより、特に多発性硬化症など免疫機能に関連するいくつかの病気のリスクや重症

度が軽減された可能性がある。太陽光の紫外線は、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）のパンデミック（SARS-CoV-2）の原因となるウイルスを不活性化し、ウイルス感染に対する人々の免疫系の反応に影響を与える役割も果たした可能性がある。しかし、入手可能なエビデンスによれば、モントリオール議定書が COVID-19 の大流行に大きな影響を与えたとは考えにくい。

主な調査結果

- ・モデル研究は、モントリオール議定書が皮膚がんの予防に貢献していることを示している。最新の研究結果によると、モントリオール議定書は、1890 年から 2100 年の間に米国生まれの人々の数百万件の皮膚がん（黒色腫と角化細胞がん）を予防したことになる（表 1）。このモデルでは、モントリオール議定書が遵守され続けると仮定した場合、2040 年以降に生まれた人々は、オゾン層破壊が UV-B 紫外線に及ぼす影響によって引き起こされる皮膚がんの過剰リスクを経験しないと推定した。この研究はモントリオール議定書の重要性を強調しているが、重要な限界は、これらの推定値が日光曝露行動、皮膚健診、または肌タイプの分布などの人口構造に変化がないと仮定していることである。その他の限界には、成層圏オゾンの傾向の不確実性や、DNA 損傷に対する作用スペクトルの選択性が含まれる。



- ・悪性黒色腫の発生率は多くの先進国で増加し続けているが、その傾向は人口や年齢によって異なる。発生率は、一部の国（イギリス、スウェーデン、カナダ、ノルウェー、フランス、リトアニアなど）では増加しているが、他の国（ハンガリー、オーストラリア、デンマークなど）では減少または横ばいで推移している。カナダ、イタリア、イギリスでは、黒色腫の発生率は高年齢層で増加したが、若年層では減少または横ばいで推移した。高年齢層における皮膚がん罹患率の増加は、成層圏オゾンの変化というよりも、一生の日光曝露量が多い結果である可能性が高い。管轄地域によって、若年層での発症率が安定または減少しているのは、移住のパターン、日焼け防止策の使用の増加、職業活動やレクリエーション活動の屋外から屋内への社会的移行を反映している可能性がある。モントリオール議定書がなければ、これらの減少は観察されなかったかもしれない。
- ・角化細胞の皮膚がんは、世界で最も一般的ながんであり、人間の健康と経済に重大な負担を与えている。角化細胞の皮膚がん（KC）には、基底細胞がん（BCC）と扁平上皮がん（SCC）が含まれる。世界の疾病負担（GBD）データの分析によると、2019 年には角化細胞の皮膚がんが世界で最

も一般的ながんとなり、次に多いがん（肺がん、220 万人）の約 3 倍の人々が罹患していることが判明した。BCC による死亡は非常にまれだが、約 56,000 人が SCC により死亡した。障害調整生存年（DALY）で測定される疾病負担は、2010 年から 2019 年の間にほぼ 25%増加した。KC の発症率はオーストラリア、ニュージーランド、アイスランド、英国を含む多くの地域で増加しているが、米国では 2005 年から 2019 年まで発生率はほぼ横ばいで推移している。角化細胞の皮膚がんの生涯リスクは、周囲の紫外線量が多い地域に住む集団でははるかに高い。例えば、オーストラリアでは、生涯リスクはイギリスの 3.5 倍である。治療費や労働者の生産性損失など、角化細胞の皮膚がんのコストは非常に高く、増加の一途をたどっている。例えば、ヨーロッパにおける黒色腫による早期死亡 1 人当たりの平均有給・無給生産性損失は、すべての癌の中で 2 番目に高く、米国では 1997 年から 2015 年にかけて、黒色腫の治療費総額は他の癌よりも速いペースで増加している。オーストラリアでは、皮膚がん（角化細胞の皮膚がんと黒色腫を合わせたもの）の治療費は他のどのがんよりも高い。これらの高いコストは、皮膚がん予防に関してモントリオール議定書が潜在的な経済的利益をもたらすことを示唆している。

- ・太陽紫外線は炎症性皮膚疾患（光皮膚症）を引き起こしたり悪化させたりし、特定の薬剤の光毒性の一因となる可能性がある。光線皮膚症は、紫外線（UV-B および UV-A 紫外線）、場合によっては可視放射線への曝露によって誘発または悪化する炎症性皮膚疾患である。これらの疾患は、その状態に伴う罹患率や、これらの疾患を管理するために必要な仕事やレクリエーション活動の減少により、生活の質の大幅な低下につながる可能性がある。かなりの数の一般的な経口薬（利尿薬や抗炎症薬など）は光感作性を示し、薬物と十分な紫外線量を曝露することにより、皮膚の発赤、腫れ、灼熱感を経験する可能性がある。光増感剤は、紫外線による DNA 損傷を通じて皮膚癌のリスクを増加させる可能性があるが、このリスクの適切な評価にはさらなる研究が必要である。
- ・モデル研究によれば、モントリオール議定書は白内障の発生率を減少させる。目を紫外線に長期間曝露すると白内障を引き起こす可能性があり、これは世界中で失明の主な原因となっている。白内障による視力喪失の主な決定要因は紫外線に対する生活様式であり、周囲の紫外線放射が多く、ケアへのアクセスが限られている地域（アジア、オセアニア、サハラ以南のアフリカなど）に住んでいる人は、中等度から重度の視力障害を平均以上の頻度で経験している。米国では、モントリオール議定書が 1890 年から 2100 年の間に生まれた 6300 万人の白内障を予防するというモデル推定がある（表 1）。

表 1. 1890 年から 2100 年の間に米国で生まれた人々の生涯を通じて、ODS の規制がない場合に比べ、モントリオール議定書の実施により回避される皮膚がんと白内障の推定数。

		モントリオール議定書の改正・調整により、ODS 規制がない場合と比較して回避される健康影響
皮膚がんの発生率	角化細胞の皮膚がん	432,000,000
	黒色腫	11,000,000
	合計	443,000,000
皮膚がんによる死亡率	角化細胞の皮膚がん	800,000
	黒色腫	1,500,000
	合計	2,300,000
白内障発生率		63,000,000

注：ここに示されている発生率の推定値は 100 万の位に、死亡率の推定値は、10 万の位に四捨五入されている。四捨五入により、合計が一致しない場合がある。

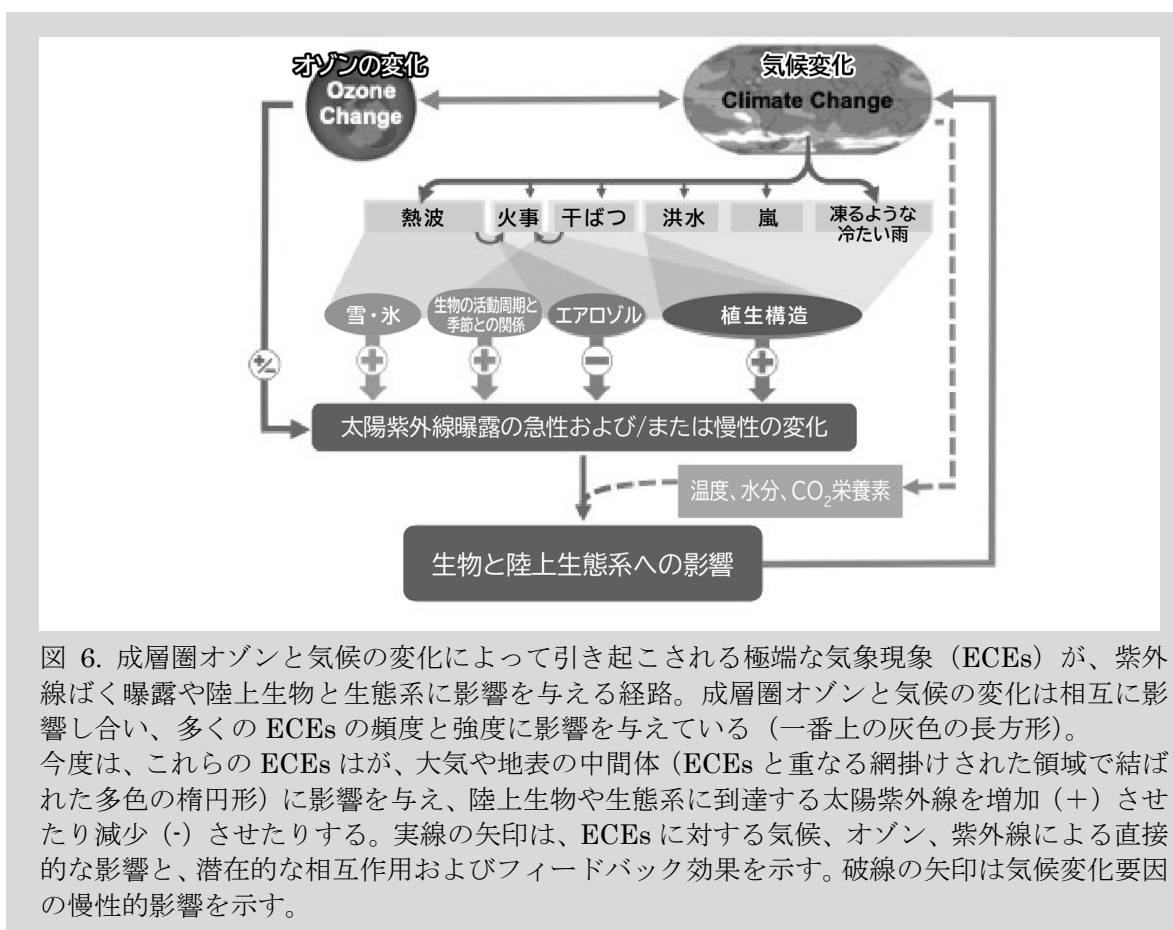
- ・皮膚や目を太陽光線にさらすと、ビタミン D が生成され、免疫系が調整され、その他にも健康に有益な効果が期待できる。日光、特に UV-B 線に皮膚をさらすことの最もよく知られた利点は、ビタミン D の産生である。ビタミン D は筋骨格系の健康維持に不可欠であるが、最近の知見によると、ビタミン D の状態を評価するために測定される分子である 25-ヒドロキシビタミン D (25(OH) D) の低レベルは、多発性硬化症、呼吸器感染症、冠動脈性心疾患など、様々な健康リスクの増加とも関連している可能性がある。ビタミン D とは別に、皮膚を紫外線にさらすと、皮膚の局所的な免疫系と体の離れた部位の免疫系が変調をきたす。これは皮膚がんのリスクを高めるが、炎症を抑制するという二面的効果がある。UV-A (およびおそらく UV-B) 紫外線が皮膚から一酸化窒素を放出し、血圧や代謝に有益であるという新たなエビデンスがある。目を太陽にさらすことで、近視のリスクを減らすことができる。日光への曝露によるリスクと利益のバランスをとることは挑戦に価する様である。モントリオール議定書がなければ、高い UV インデックスの紫外線を浴び短時間で皮膚障害を引き起こし、人々が屋外で過ごす時間は制限され、日光への曝露の恩恵は減少していただろう。
- ・太陽紫外線は COVID-19 の原因ウイルスである SARS-CoV-2 を不活性化することができるが、モントリオール議定書は COVID-19 の感染にはほとんど影響を及ぼしていないと思われる。新たに開発された作用スペクトルは、UV-B と UV-A の両方の紫外線が SARS-CoV-2 ウイルスを不活化できることを示している。ウイルスの不活性化に必要な曝露時間の見積もりは研究によって異なるが、最も信頼性の高いデータによると、唾液中に埋め込まれたウイルス粒子の 90%は、中・低緯度の夏の真昼近くの晴天下で起こるような最適な高日射条件下では、日射により約 7 分以内に不活性化される。高緯度地域では、冬季の日中早い時間帯や遅い時間帯に不活性化させるためには、太陽紫外線に長時間 (~13 分以上) 曝露する必要があるであろう。エアロゾル化されたウイルス粒子では不活化時間がやや長く、曇天時やウイルス粒子が太陽光線から遮蔽されている場合は不活化時間が長くなる。このウイルスの人から人への主な感染様式は、混雑した屋内での呼吸、くしゃみ、咳によって発生する呼吸飛沫やエアロゾルを介して起こるようであるため、屋外の表面の紫外線による物質表面の消毒が COVID-19 の制圧に重要な役割を果たしたとは考えにくい。
- ・戸外環境レベルの紫外線への曝露は、COVID-19 の発症率または重症度を減少させる可能性があるが、因果関係のメカニズムは不明であり、不確実性が高い。COVID-19 の発症率や重症度は、周囲の太陽紫外線と逆相関することが多くの研究で示されている (すなわち、紫外線が多いほど COVID-19 の症例数は少なく、重症度も低い) が、多くの交絡した相反する因子 (例えば、気温、湿度、全日射量などの他の環境因子、ウイルス感染や疾病管理に影響する因子) が考えられる。したがって、これらの関係の因果関係は不明である。一部の研究では、血中ビタミン D (25 (OH) D) 濃度と SARS-CoV-2 陽性リスクまたは COVID-19 の重症度との間に逆相関があることが判明した。ビタミン D が COVID-19 のリスクや結果と因果関係があることが判明した場合、あるいは免疫系に対する紫外線の他の影響が重要である場合、日光曝露による有益な効果と、肌の色が薄い人における日焼けや皮膚がんのリスクとのバランスをとるために、細心の注意が必要である。一般的に、モントリオール議定書の実施による人間の健康に対する広範で肯定的な結果は、モントリオール議定書がない場合に発生したであろう COVID-19 の感染と重症度に対する太陽紫外線の影響によって得られたかもしれない潜在的な利点を上回る。おそらく最も重要なことは、モントリオール議定書によって、人々が屋外で過ごす時間を減らし、COVID-19 感染のリスクがはるかに高い屋内で過ごす時間を増やす原因となるであろう UV-B 紫外線の大幅な増加が回避されたことである。

4 陸上生態系と生物地球化学的循環

紫外線量と気候の変化は相互作用して、陸上生態系と生物地球化学的循環（炭素や窒素などの栄養素の循環）に影響し、その結果、食料安全保障、生物多様性や気候にも関与する可能性がある。もし、モントリオール議定書が採択されていなければ、極端に多量の太陽紫外線ばく露により、多くの動植物や微生物が顕著な悪影響を受けていたはずである。しかし、陸上環境に生育するほとんどの生物種は、少なくともオゾン層が著しく破壊されない範囲では、太陽紫外線の有害な影響を許容あるいは回避するメカニズムを進化させてきた。それでも、気候変化とともに、上記のような適度なレベルの太陽紫外線にさらされると、食物の品質、害虫や病原菌に対する植物の防御、植物の成長、その他の生物ストレスに対する耐性、落葉落枝や農薬の光分解などが変化することにより、農業生態系を含む陸上生態系の生産性と生物多様性が影響を受ける可能性がある。重要なことは、紫外線や短波長の可視光による落葉落枝の光分解は、細胞壁成分の分解と栄養循環を促進し、その結果、二酸化炭素や亜酸化窒素などの温室効果ガスを排出し、気候システムに正のフィードバックをもたらすことである。

主な調査結果

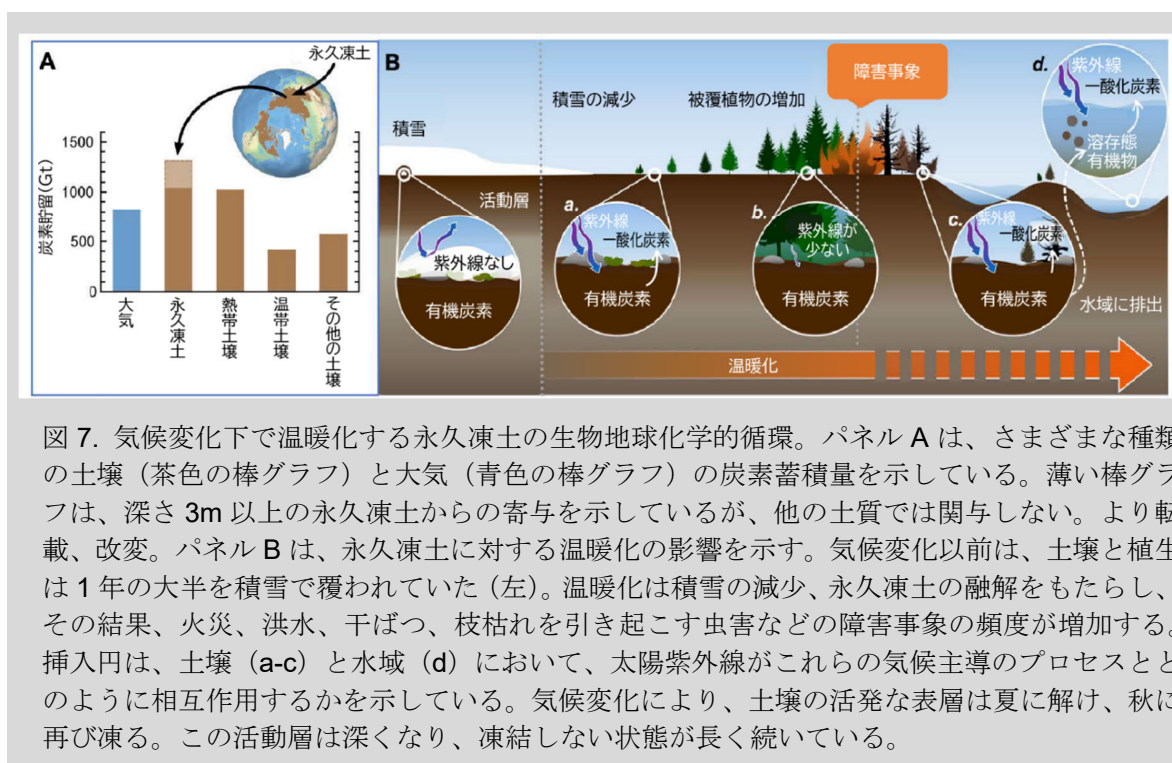
- ・気象変化に伴い、極端な気象現象はより一般的になりつつある。こうした気象現象は生物の紫外線ばく露量を変化させ、陸上生態系を混乱させる可能性が高い。世界的に、より強い暴風雨、壊滅的な洪水、長引く干ばつ、異常な熱波、より激しい山火事、その他の極端な気象現象（ECEs⁵）は、多くの陸上生態系の構造と機能に長期的な混乱をもたらしている。雲量やエアロゾルの変化とともに、これらの ECEs は、現在のまたは予測される成層圏オゾン濃度の変化よりも影響が大きく、極域以外の地域に生息する陸上生物が受ける紫外線量を変化させている可能性が高い（図 6）。このような太陽紫外線照射量の変化は、生物多様性、生物の生産性、温室効果ガスの排出、生態系の炭素貯留に影響を与える可能性があるが、その影響の大きさは現時点では明らかでない。
- ・進行中の気候変化により植物は紫外線量とその他の環境要因の新たな組み合わせにさらされ、ストレス耐性や食品の品質に影響がでる可能性がある。気候変化が干ばつの頻度と深刻さを高めているため、特に懸念されるのは、高い UV-B 放射と干ばつの組み合わせである。干ばつ期間には、特に中・低緯度地域で、高い紫外線照射を受けることが多い。紫外線照射と乾燥ストレスに対する耐性メカニズムにおいては分子経路が共有されているため、適度なレベルの紫外線に対する植物の反応は、乾燥に対しても何らかの防御作用をもたらす可能性がある。この交差耐性は、両方のストレスが過剰でない限り、乾燥が作物の成長と収量に及ぼす有害な影響の一部を軽減する可能性がある。紫外線量と様々な気候要因は相互に作用して、作物の種類や環境条件にもよるが、食品の栄養品質にプラスとマイナスの両方の影響を及ぼす可能性がある。



5 極端な気象現象とは、「統計的に稀な、あるいは異常な気候の周期が、生態系の構造や機能を、典型的な、あるいは通常の変動と考えられている範囲から大きく逸脱して変化させる現象」と定義されている。あるいは同様に、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）によれば、「ある変数の値が閾値を上回る（又は下回る）場合」である。複合的な極端現象とは、「社会的または環境的リスクに寄与する複数の要因および/または危険の組み合わせ」である。複合的な極端現象の例としては、高温、乾燥、風の強い条件が組み合わさった火災気象条件が挙げられる。

- ・特定の作物、特に熱帯や山岳地帯で栽培される作物は、UV-B 紫外線の比較的小さな増加に対して脆弱である可能性がある。気候変化に伴って生物気候帯が変化しているため、特定の作物は以前よりも標高の高い場所で栽培されるようになっている。作物植物、特に熱帯地方で栽培される作物植物の種によっては、標高の高い場所での強い紫外線が紫外線耐性を超え、DNA やタンパク質に損傷を与え、生理や生育に悪影響を及ぼす可能性がある。作物種が新しい生息地で栽培されるようになると、作物種も新しい雑草、害虫、病原菌に遭遇するようになる。紫外線への曝露は、植物間の競争や草食動物に対する防御に影響を与えることが知られており、紫外線条件の変化は、作物植物と雑草や害虫との相互作用に影響を与えることで、これらの農業生態系の構造や機能をさらに混乱させる可能性がある。また、気候変化が生息域のシフトや生物の活動周期と季節との関係に及ぼす別々の効果は、受粉媒介者とその宿主植物との間に空間的および/または時間的・季節的不一致をもたらす可能性があり、農業生態系の機能と食料安全保障の両方にリスクをもたらす可能性がある。

- ・気候変化は、生物種にとって適切な生息地の利用可能性を減少させ、生物種の分布域を移動させることによって、生物多様性の減少に寄与する可能性があり、分布域の移動により紫外線への曝露量が増加し、種の相互作用が混乱する可能性がある。動植物種は、現在進行中の気候変化に対応して、その分布域をより高い標高や緯度へ移動しており、このような変化は、太陽紫外線への曝露を減少（極方向への移動）または増加（標高方向への移動）させる可能性がある。紫外線が気候変化と相互作用して種の分布に影響を与えることを示唆するモデルもあるが、こうした影響の根底にあるメカニズムは不明である。それにもかかわらず、これらの変化に起因する紫外線照射量の変化は、植物の成長形態や二次化学物質（例えば、フラボノイドやその他のフェノール化合物）を変化させる可能性が高く、植物の競争力や草食動物に対する防御力に影響を与える可能性がある。場所によっては、こうした種の相互作用の変化が生物多様性に悪影響を及ぼす可能性がある。
- ・太陽紫外線は、多くの陸上生態系で枯れた植物体（落葉落枝）の分解を促進し、炭素貯留や気候に影響を与える。落葉落枝の分解は、陸上生態系における栄養循環、エネルギーの流れ、炭素貯留などの速度を決定する重要な生物地球化学的プロセスである。落葉落枝を太陽紫外線や短波長の可視光線（すなわち、青色光や緑色光）に曝露すると、リグニンやその他の植物細胞壁成分の直接的な光化学分解（すなわち、光ミネラル化）によって、また間接的に微生物の分解を促進（すなわち、光促進）することによって、落葉落枝の分解速度を高めることができる。現在、落葉落枝の光分解は、様々な気候地域（例えば、砂漠、草原、森林）にわたる多種多様な生態系において重要であると認識されているが、光ミネラル化と光促進との相対的な重要性は生息地によって異なる可能性がある。新たに開発された光ミネラル化の作用スペクトルによると、このプロセスを促進するためには、UV-A は UV-B 紫外線よりも効果的である。したがって、オゾン層破壊が光分解のこの側面に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。光分解は、炭素だけでなく他の元素（例えば、窒素やリン）の循環と貯留に影響を及ぼし、陸上生態系による温室効果ガス排出の重要な経路となりうる。
- ・永久凍土の融解は北極圏の生態系を不安定化させ、太古から存在する有機炭素源を太陽紫外線照射による光分解にさらしている。世界の土壌は大量の炭素を蓄積しており、その量は大気約 2～3 倍である（図 7A）。したがって、気候の乱れによって引き起こされる土壌の不安定性や劣化は、たとえ小さなものであっても、炭素の大量放出につながる可能性がある。土壌炭素の大部分は北半球の高緯度地域に蓄積されており、そこでは泥炭地や永久凍土の中で、長い期間、多くは数千年にわたって安定した状態を保ってきた。気候が温暖化するにつれ、永久凍土の融解が進み、この古代の有機物が分解され、二酸化炭素、メタン、その他の温室効果ガスが放出される。融解した永久凍土の有機物は、溶存態有機物（DOM）として水圏生態系に入り込み、そこで太陽紫外線による光分解を受けやすくなる。氷や雪が減少したり、植生や雲量が増えたりすることで、紫外線への曝露量がさらに増加し、これらの光分解プロセスの規模や北極圏の生物に影響を及ぼしている（図 7B）。
- ・水生生態系における紫外線による溶存態有機物の光分解は、気候変化を悪化させる可能性のある温室効果ガスを放出する。気候変化は、湖、河川、沿岸水域への溶存態有機物（DOM）を豊富に含む陸上流出を促進し、光分解を受ける DOM の量を増加させている。DOM のもう一つの重要な供給源は、北半球の永久凍土である（図 7）。中緯度における DOM の光分解から生じる CO₂ の排出は、微生物による DOM のミネラル化から生じる排出に比べれば一般にごくわずかであるが、高緯度では大きな役割を果たしている可能性がある。エドマ（有機物が豊富な永久凍土）が豊富な北極圏の流域における DOM の直接的な非生物学的な光化学分解（すなわち、光ミネラル化）の規模は、無視できるものから CO₂ 総排出量の 75～90% までと推定されており、未だ不確かである。DOM の光反応性が季節や水質によってどのように変化するかを理解することは、高緯度の生態系における光化学的 CO₂ 排出の程度や、気候や紫外線の変化によって引き起こされるその変化を予測する上で極めて重要である。



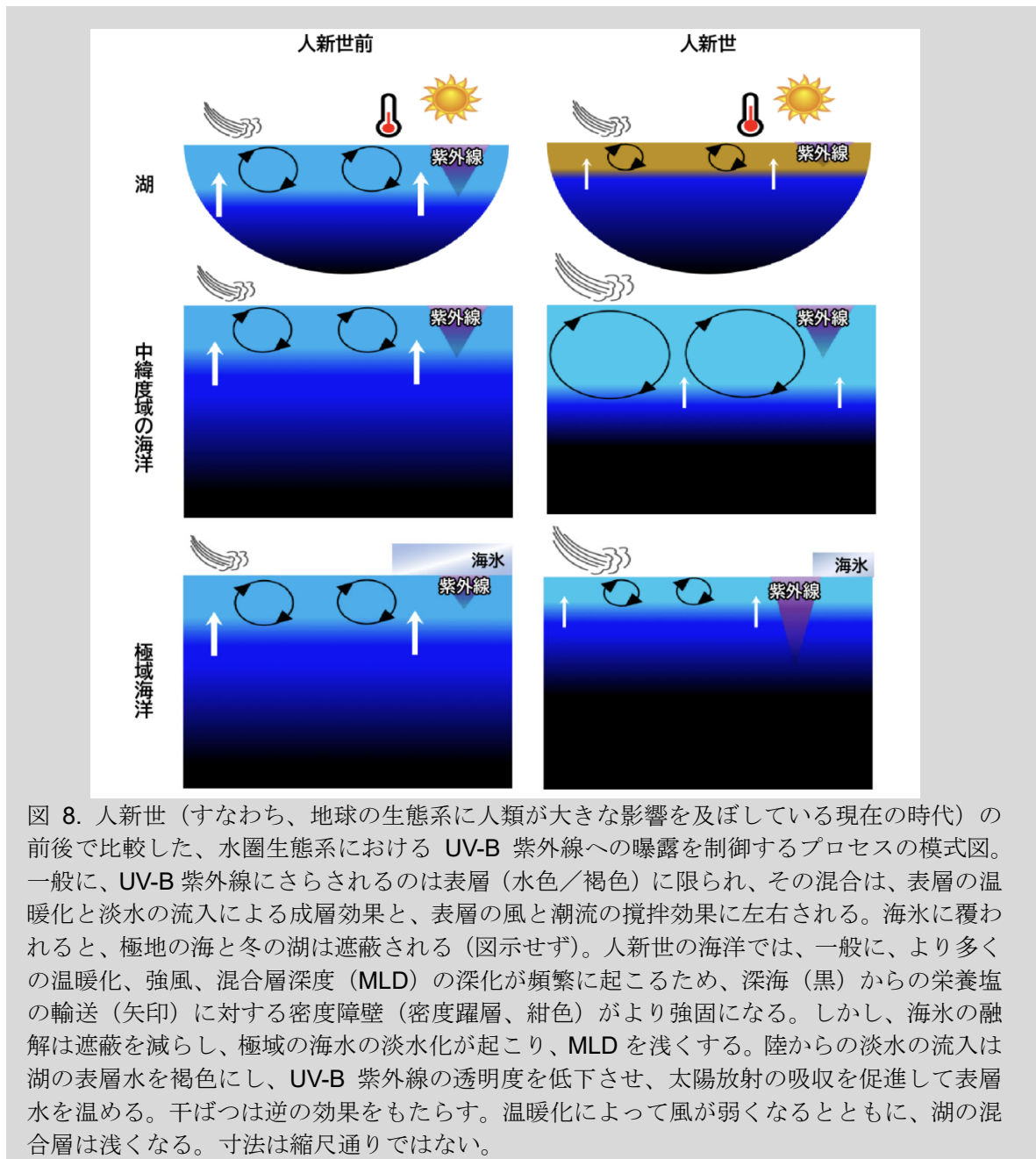
5 水圏生態系

気候変化や人間の活動に伴う成層圏オゾンの変化は、水生環境を変化させ、水圏生態系の紫外線への曝露を変化させ、種の分布、生物地球化学的循環、およびこれらの生態系が提供するサービスに潜在的な影響を及ぼしている。気候変化は、混合の深さ、氷の厚さ、氷のない状態の期間、溶存態有機物の投入量に変化をもたらし、これらすべてが紫外線への曝露を増加させたり減少させたりする（図 8）。人間の活動は、油、日焼け止めの UV フィルター、マイクロプラスチックなどの汚染物質を水生環境に放出し、それらは紫外線によって変化し、水生生物や水生環境への悪影響を増幅させる。こうした変化は、地球温暖化や海洋酸性化といった他の環境変化と組み合わせ、水生環境の微生物、大型藻類、動植物に影響を与える。世界の河川、湖、海洋が提供する重要なサービス（例えば、淡水の供給、レクリエーション、輸送、食糧安全保障）に対するこれらの影響による破壊的な結果を最小限に抑えるには、モントリオール議定書を引き続き遵守するだけでなく、将来の地球気候の条件下における水圏生態系の研究やモデルに、太陽紫外線とその影響を広く含める必要がある。

主な調査結果

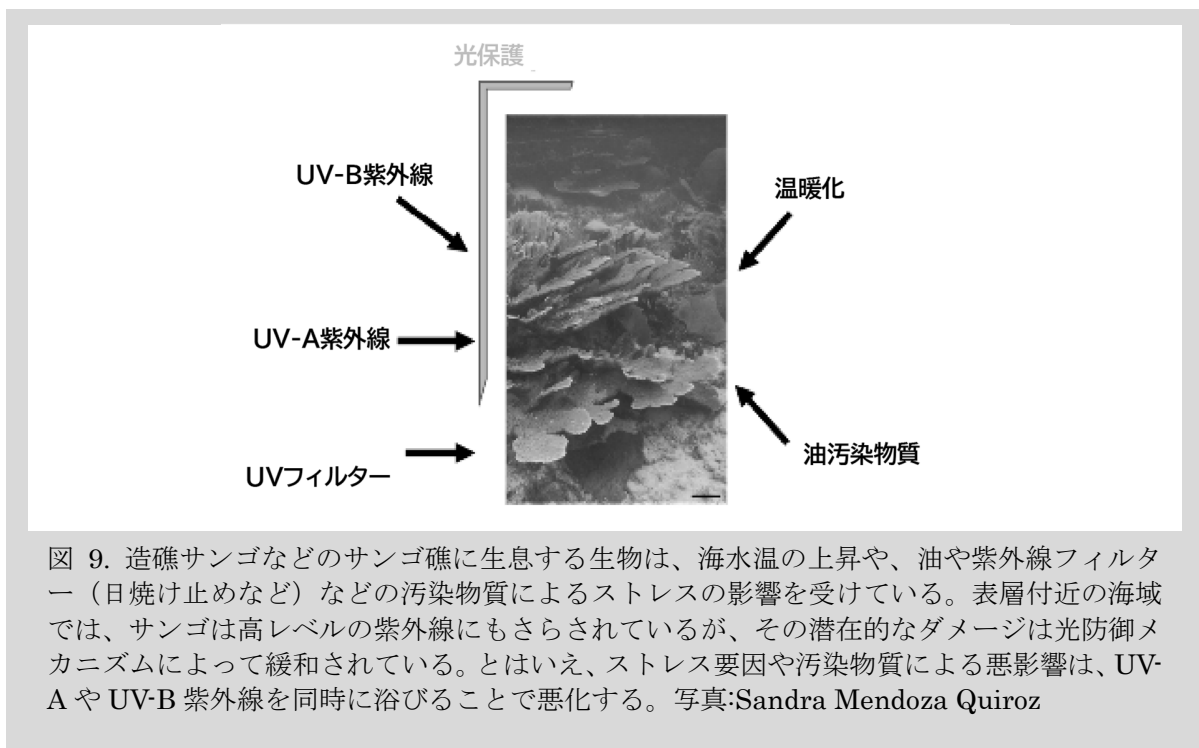
- ・オゾン層破壊と気候変化は、混合層の深さを変化させることによって、海洋表層における紫外線曝露を変化させているが、その影響は緯度によって異なる。約 50 年間（1970 年～2018 年）の自由浮遊装置や船舶に搭載されたセンサーのデータを分析した結果、世界の海洋の水循環が深くなっていることがわかった。表層からの循環の最大深度である混合層深度（MLD；図 8）は、平均して 10 年当たり 2.9% 深まり、MLD に 10 年当たり約 5～10m の深さが加わった。生

物は深く循環するほど、紫外線にさらされる量が減る。深化の傾向は地域によって異なり、南極海の大部分では深化が大きく、北大西洋では深化が小さいが、赤道付近や北極の高緯度地域では浅くなっている。南極海の混合層の深化は、オゾン層破壊の影響を受ける南半球環状モードの正相に伴う地上風の強まりと関連している。



・人為的要因と紫外線の組み合わせは、水圏生態系、特に熱帯のサンゴ礁生態系へのストレスを悪化させている。熱帯サンゴ礁は、サンゴ礁を形成するサンゴと共生する渦鞭毛藻（シムビオディナミ科）との共生関係に基づき、非常に多様性に富み、商業的に重要な生態系であるが、水面に近い透明度の高い熱帯の海域に生息しているため、自然に高レベルの紫外線にさらされる。いくつかの研究から、UV-B 紫外線への曝露は共生生物に有害な影響を及ぼす可能性があることが示されているが、

宿主であるサンゴへの悪影響は多くの場合明らかではない。共生生物にストレスがかかると、共生生物はサンゴの宿主から追い出され、サンゴは白化する可能性がある。これらの共生生物の健康への悪影響が、海面の海水が温かく酸性化し続けるにつれてサンゴの白化がより一般的になっているため、懸念されている。これらの影響は、サンゴ生態系への UV-B 紫外線の影響を悪化させる可能性がある。サンゴ礁は、石油汚染物質や日焼け止めから溶出する化学物質にも脆弱で、UV-B 紫外線や気候変化によってその有害性が高まる可能性がある（図 9）。



- ・ **太陽紫外線は油汚染物質を分解するが、水生生物に対する毒性を高める。** 最近の研究では、太陽紫外線が流出油から汚染物質を除去する重要な要因であることが確認されている。例えば、ディープウォーター・ホライズン流出事故の 102 日間に、紫外線による水溶性有機炭素の生成（光分解とも呼ばれる）は、油除去全体の約 8%（推定範囲：3～17%）を占め、これは広く認められている他の除去プロセス（蒸発と海岸への打ち上げ）に匹敵する量であった。大量の紫外線に曝露すると、サンゴ、海綿動物、軟体動物、多毛類、甲殻類に対する油成分の毒性も増加する可能性がある。一般的に、紫外線への曝露は油の毒性研究の一部ではなかったが、これらの結果は、今後の研究にこのような曝露を含めることで、海面または海面付近で発生した流出油の運命と毒性に関する理解が深まることを示唆している。

6 空気の質と汚染物質

太陽紫外線は、大気汚染（対流圏オゾン（ O_3 ）と粒子状物質（PM））の形成に大きく寄与しており、これは世界的に人間の健康にとって重大な問題であると認識されている。しかし、紫外線は大気を汚染物質から浄化する役割も果たしており、大気汚染は地表への紫外線の浸透に影響を与える。このように、成層圏オゾンと気候の変化は、さまざまな種類の大気汚染に複雑な、時には相反する影響を及ぼす可能性がある。太陽紫外線は、水圏および陸上生態系における汚染物質の分解においても重要な

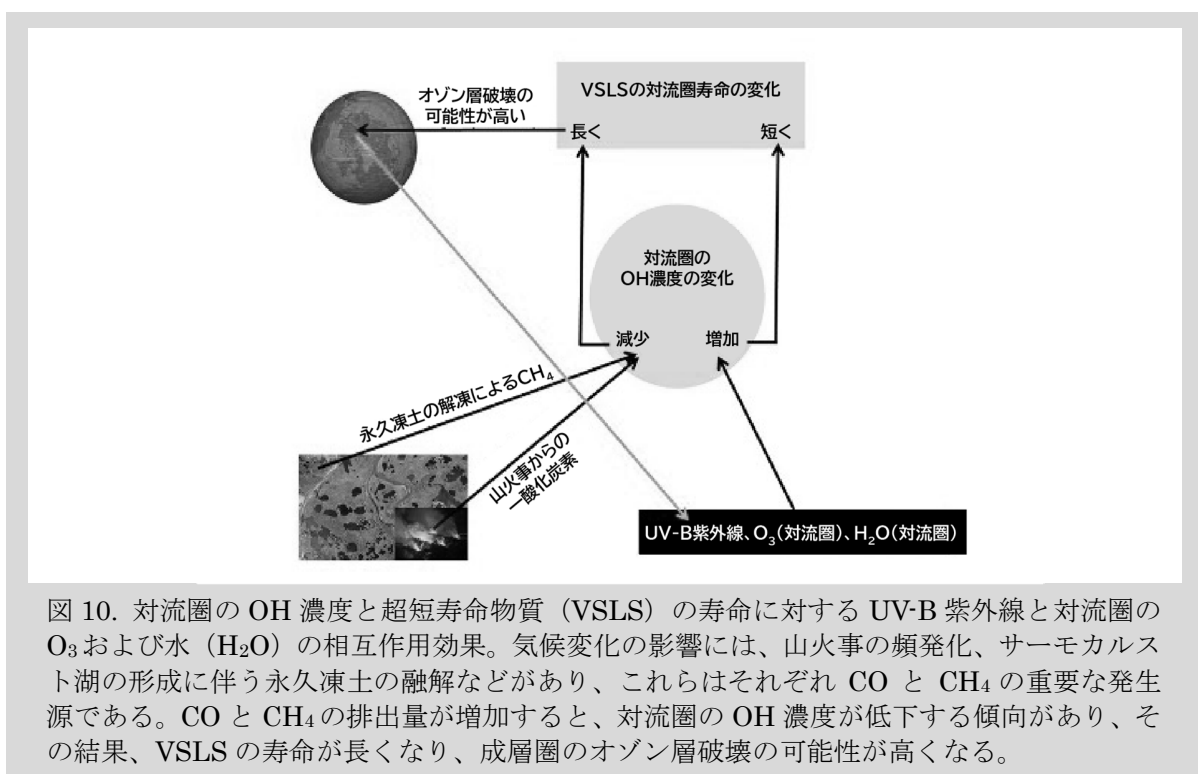
役割を果たしているが、これらの変換が生態学のおよび人体に及ぼす影響については、まだ十分に理解されていない。ODS の代替に使われる化合物による環境汚染は、依然として懸念されている。

主な調査結果

・太陽紫外線、特に UV-B 紫外線は、対流圏の大気品質を悪化させ、人間の健康に有害な影響を及ぼす可能性がある。世界的に見て屋外の空気の品質が悪いと、呼吸器系、心臓血管系、生殖器系、神経系の障害に関連する罹患率が高まり、年間 400 万人以上の早期死亡が発生する。対流圏 O_3 や PM の紫外線による生成に必要な成分である窒素酸化物 (NO_x) や二酸化硫黄 (SO_2) の排出量を、厳格な汚染対策によって長期的に削減したため、一部の地域（例えば、中国）では大気質（例えば、PM）の改善が見られた。モントリオール議定書の結果、UV-B 紫外線が減少すれば、汚染源（例えば、交通による NO_x の排出が多い都市）の近くでは O_3 の純生成量が減少し、汚染地域からの距離が遠くなるほど O_3 の消費が遅くなると予想される。成層圏の O_3 が 1980 年の値に戻るか、あるいはそれを上回るような将来のシナリオは、都市部の O_3 汚染を改善するのに役立つかもしれないが、都市周辺部に到達する O_3 汚染を悪化させるかもしれない。PM については、関連する光化学プロセスの知識に基づいて、紫外線の変化に対する感受性が予想されるが、体系的に研究されていないため、定量化されていない。

・対流圏のオゾンや粒子状物質は、森林や都市周辺部の農作物の収穫量に悪影響を及ぼし、経済的にも重要な影響を及ぼす。対流圏の O_3 は、農作物やその他の植物の成長、品質、収量に大きな損失をもたらすことが知られており、最近の研究ではこれらの影響がさらに定量化されている。例えば、1980 年から 2019 年の間に実施された、大豆に対する慢性的な対流圏 O_3 曝露の影響を調べた 48 件の研究の最近のメタ分析では、 O_3 が葉面積を 21%、葉、芽、根のバイオマスをそれぞれ 14%、23%、17% 減少させ、種子収量を 28% 減少させたことが示された。米国で栽培されているトウモロコシと大豆の大気汚染物質による過去の損失に関する研究によると、 O_3 、 SO_2 、PM、 NO_2 の管理が改善されたことで、収量が平均 20% 増加した。これらの汚染物質のうち、PM と NO_2 は O_3 と SO_2 よりも大きな被害をもたらすようだ。全体として、汚染物質の管理強化による収量の向上は、約 50 億米ドルに相当する。

・太陽紫外線はまた、対流圏の汚染物質や温室効果ガスの浄化にも大きな役割を果たしている。対流圏の主要な浄化剤である紫外線生成ヒドロキシ基 (OH) は、多くの大気汚染物質や温室効果ガス (GHGs) を除去する (図 10)。1980 年から 2020 年にかけての成層圏オゾン層破壊に起因する紫外線の増加は、OH に影響を与える他のいくつかの因子（例えば、気温、湿度、対流圏 O_3 の前駆物質の排出増加）とともに、全世界平均の OH 濃度にわずかな増加（約 3%）をもたらしたことが研究によって示されている。ヒドロキシ基は、GHGs（例えば、メタン CH_4 ）や、いわゆる超短命物質 (VSLs: 大気寿命が 6 ヶ月以下のハロゲン有機物) などの ODS を含む、多くの環境上重要な化学物質と反応する。このような反応は、大気中の化学物質の寿命と量を制御している。 CH_4 については、紫外線による OH の増加は、濃度の増加を 40ppb 相殺するか、排出量を 15Tg y^{-1} 減少させることに相当する。VSLs の場合、OH の変化は複雑なフィードバックの一部であり (図 10)、まだ完全には定量化されていない。



- ・オゾン層破壊物質の代替によるトリフルオロ酢酸濃度の上昇は、現時点では人間や環境に重大なリスクをもたらすとは予想されていない。トリフルオロ酢酸（TFA）は、遠隔地も含めて環境中で発見され続けているが、濃度は非常に低いため、現在のところ、人や生態系に毒物学的影響を及ぼす可能性は極めて低い。TFA の蓄積量は、ODS から短寿命のフッ素系化学物質への代替が計画されているため、増加すると予想される（図 11）。しかし、これらの TFA の前駆物質の将来的な使用予測に基づけば、害はないと予想される。TFA の他の発生源（例えば、潜在的な自然発生源、フッ素系農薬、医薬品）の規模に関しては大きな不確実性があり、これらはモントリオール議定書の管轄外である。トリフルオロ酢酸は、より長鎖のポリフルオロアルキル化合物（PFAS）とは大きく異なる生物学的特性を有しており、TFA をこの大きな化学物質群に含めて規制対象とすることは、TFA のリスク評価と矛盾する。

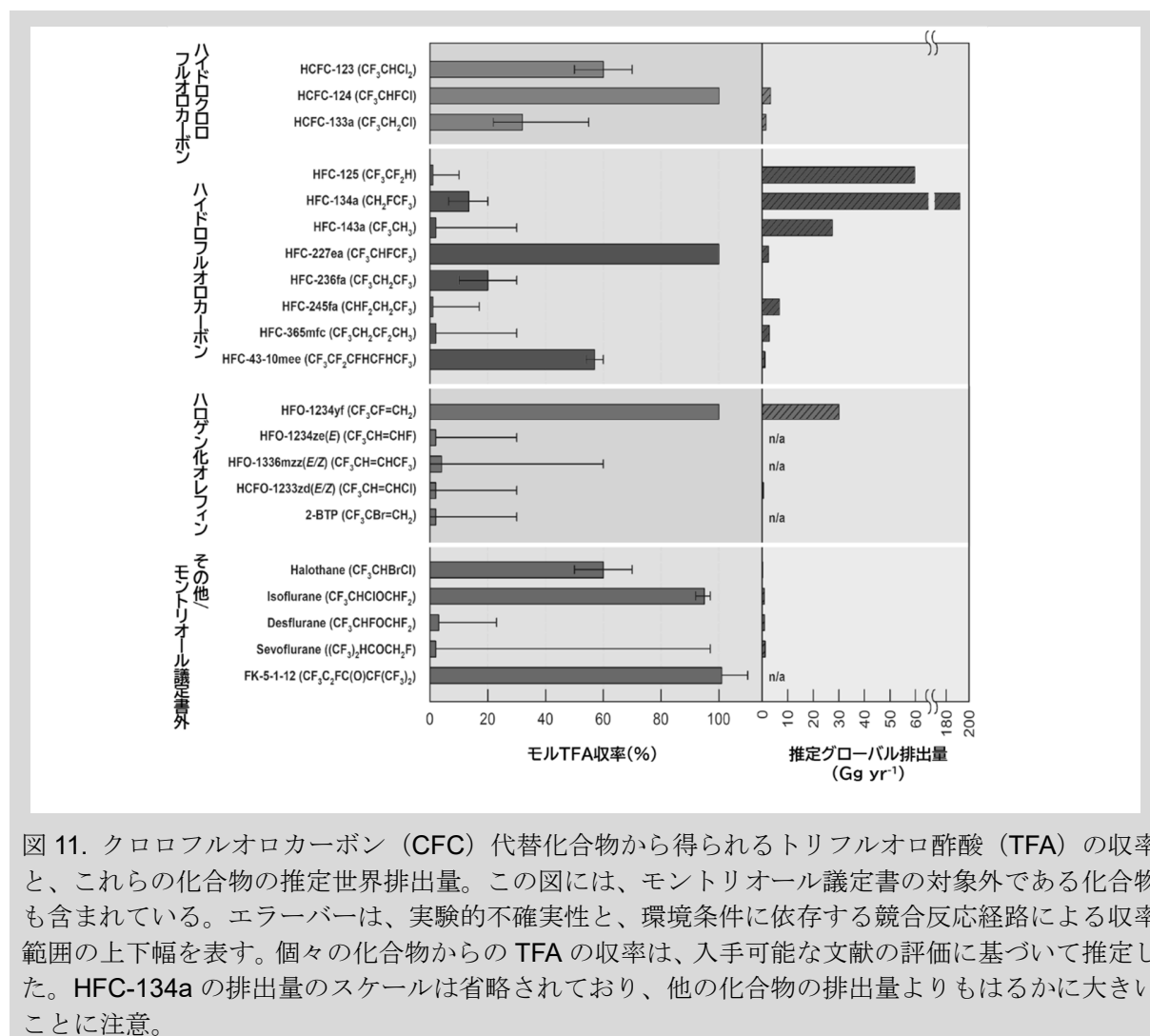


図 11. クロロフルオロカーボン (CFC) 代替化合物から得られるトリフルオロ酢酸 (TFA) の収率と、これらの化合物の推定世界排出量。この図には、モントリオール議定書の対象外である化合物も含まれている。エラーバーは、実験的不確実性と、環境条件に依存する競合反応経路による収率範囲の上下幅を表す。個々の化合物からの TFA の収率は、入手可能な文献の評価に基づいて推定した。HFC-134a の排出量のスケールは省略されており、他の化合物の排出量よりもはるかに大きいことに注意。

7 素材とプラスチック

太陽紫外線は、繊維製品だけでなく、建材に使用される木材やプラスチックなどの天然素材や合成素材の老化や劣化の原因となっている。この劣化は素材の表面で起こり、熱や湿気といった他の環境因子が入り込み、より深い層を劣化させる。したがって、紫外線による表面的な変化は、素材の全体的な老化につながる。このように、オゾン層破壊と気候変化は相互に影響し合い、素材の老化プロセスとその耐用年数に影響を及ぼす。こうした経年劣化を最小限に抑える新技術が開発され、その結果、寿命が延び、天然資源や廃棄物の使用が減り、有害な可能性のあるマイクロプラスチックやナノプラスチックの放出が減少した。

しかし、プラスチックの生産と、環境、特に水生環境におけるマイクロプラスチックやナノプラスチックの蓄積は、引き続き懸念されている。二次マイクロプラスチックは、太陽光紫外線によって光酸化されたプラスチックごみが破碎される際に、環境中で生成される可能性がある。紫外線の増加を防ぐということで、モントリオール議定書は、この条約がなかった場合に比べ、マイクロプラスチックの環境中での生成と蓄積を遅らせたと考えられる。

主な調査結果

- ・環境により優しい添加剤が開発され、プラスチックや木材に使用され、太陽紫外線によるこれらの材料の劣化を軽減している。環境的に持続可能な技術や建材を開発しようという最近の傾向から、コーティング剤、プラスチック、日焼け止めに植物由来の無害な添加剤を使用する必要が出てきた。紫外線安定剤を含む添加剤をプラスチックやコーティング剤に選択する際、これらの添加剤はしばしば溶出して環境を汚染するため、潜在的な生態毒性を最小限に抑えることにますます注目が集まっている。いくつかの木材抽出物とリグニンナノ粒子は、木材の表面変色に対する紫外線遮蔽材としての有効性が試験されている。リグニンのナノ粒子を塗料や日焼け止めに応用することで、合成紫外線吸収剤の代替や補完が期待できる。しかし、リグニンの好ましくない暗色は、リグニンベースの UV 遮蔽製品の欠点であり、対処する必要がある。
- ・ソーラーパネルに使用される太陽電池モジュールの寿命を延ばすための新技術が開発されている。太陽電池 (PV) モジュールのポリマーは、太陽光の紫外線にさらされると酸化を受け、これがシステムのもろさ、劣化、寿命の低下を引き起こす (図 12)。実験室での加速試験により、PV モジュールのさまざまな劣化メカニズムについての理解は進んだが、屋外や実際の使用条件下での劣化の正確な予測はまだ不十分である。これらのシステムで使用される封止材に代わるより優れた材料を探す努力の結果、アイオノマーや熱可塑性ポリオレフィンなど、いくつかの候補ポリマーが見つかった。そして、特に両面 PV セルおよびモジュールに特化して設計された新しい透明バックシートが導入されている。これらのモジュールは、反射した太陽光をモジュールの裏側で集め、単位面積当たりの発電量を増加させる。

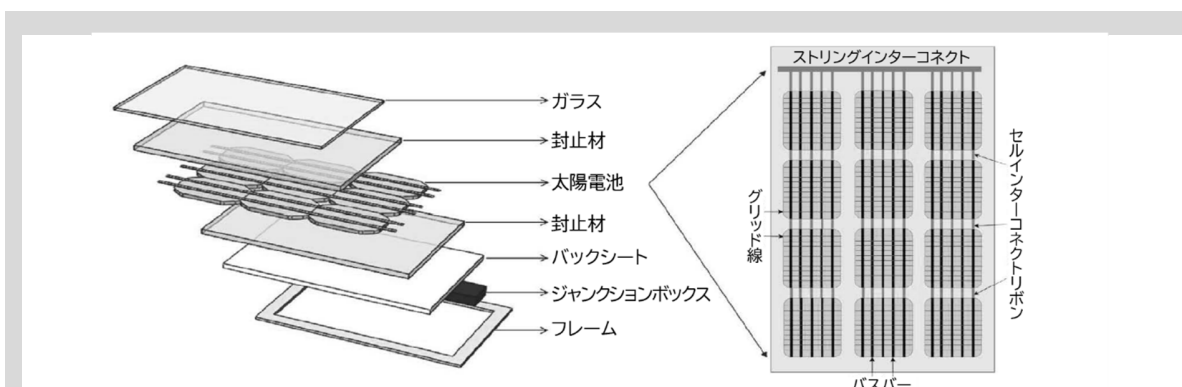


図 12. 太陽紫外線による劣化の影響を受けやすいプラスチック材料でできた封止材、バックシート、ジャンクションボックスを示す結晶シリコン太陽電池 (PV) モジュールの構成部品。

- ・太陽紫外線はプラスチックの風化を引き起こし、最終的にマイクロプラスチックやナノプラスチックが断片化され、形成される。環境中のプラスチック破片は、1950 年代以降、推定 8 億 3,000 万トンが生産され、そのうち約 80% が埋立地や自然環境に埋め立てられており、増加する汚染問題として認識されている。自然環境では、マイクロプラスチック (<5 mm) およびナノプラスチック (<0.1 μm) が、機械的な力にさらされることによる断片化と組み合わせ、プラスチック破片の太陽紫外線による風化の結果として生成される (図 13)。太陽紫外線への曝露は、プラスチック破片の主な風化メカニズムである。屋外に長時間さらされたプラスチック破片は、このような光酸化を受け、材料が弱く、もろくなり、その後断片化しやすくなる。その後、プラスチックが波動や動物との遭遇などの要因にさらされることで断片化が起こり、二次的なマイクロ粒子やナ

ノ粒子が生成される。マイクロプラスチックやナノプラスチックの潜在的な影響が懸念されているが、これらの汚染物質が人間の健康や環境に及ぼすリスクは今のところ不明である。それにもかかわらず、より持続可能な未来に向けて、プラスチックに関する世界的な条約を求める声がある。

- ・モントリオール議定書が施行され、その結果、太陽からの **UV-B** 紫外線が避けられるようになったことが、環境中のマイクロプラスチックの増加を防いでいると考えられる。モントリオール議定書によって回避された地上の太陽 **UV-B** 紫外線の大幅な増加は、**UV** による光酸化の割合を増加させ、その結果、マイクロプラスチックを生成するプラスチック破片の断片化を引き起こしたであろう。しかし、モントリオール議定書がマイクロプラスチック生産に与える影響の推定は、光酸化反応の紫外線線量反応や、紫外線への曝露に影響するさまざまな環境（土壌、水など）内でのプラスチックの分布の不確実性によって制限されている。このように、紫外線によるプラスチックの光酸化とその後の断片化はよく知られているが、このプロセスがプラスチックの寿命、マイクロプラスチックの発生、生態系への影響に与える定量的な影響は、現在のところ不明である。

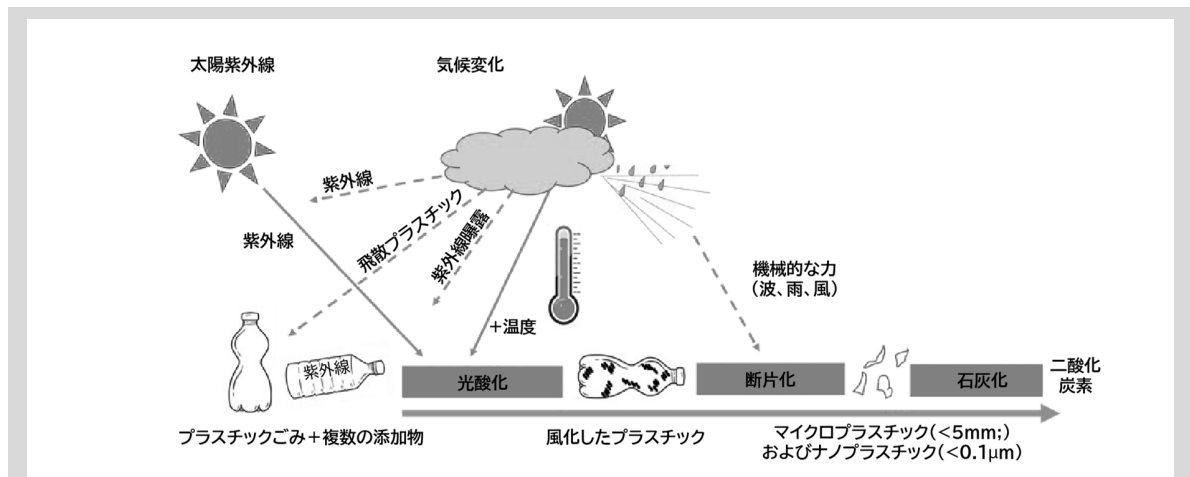


図 13. 太陽光紫外線はプラスチックの光酸化を促進し、プラスチックを粉砕しやすくし、その結果、マイクロおよびナノプラスチック粒子が形成される可能性がある。プラスチックの鉱化作用が報告されているが、自然環境におけるこのプロセスの関連性はまだ確立されていない。気候は、太陽紫外線への直接的な影響、プラスチックの飛散、水柱を通じた紫外線の浸透、気温の上昇など、さまざまな経路を通じて光酸化に影響を与えている。

8 結論

総括要旨は、4 ヶ年アセスメント全文とともに、成層圏オゾン、紫外線、気候の変化が相互に影響し合い、人間の健康と環境に影響を及ぼす多様性を示している。太陽紫外線、特に **UV-B** 紫外線への曝露は、人間や他の生物に有害な影響を及ぼす可能性がある一方で、紫外線への適度な曝露は、人間の健康、食糧の質、害虫に対する植物の防御、水域の殺菌、有毒な汚染物質のより安全な副産物への変換に有益な影響を及ぼす可能性がある。モントリオール議定書がなければ、太陽紫外線のプラス効果とマイナス効果の最適なバランスを維持することは、不可能ではないにせよ、難しかっただろう。また、モントリオール議定書が直接的・間接的に地球の気候を保護し、気候変化の悪影響を緩和していることを示す証拠も増え続けている。

前回の 4 ヶ年アセスメント以来、世界は地球気温の継続的な上昇、極端な気象事例（**ECEs**：例えば、熱波、干ばつ、ハリケーン）の増加、異常気象と他の要因が組み合わさった事態（例えば

山火事など）を経験しており、これらはすべて社会的・環境的リスクの増大につながっている。気候変化に関する政府間パネルで最近報告されているように、人為的に引き起こされた気候変化のため、ECE の頻度と規模は今後上昇すると予想される。ECE は、気候変化の他の側面（例えば、雲量やエアロゾルの変化）とともに、モントリオール議定書を継続的かつ完全に遵守すると仮定した場合に予想される成層圏オゾン層の変化よりも大きな程度で、人間、植物、動物、素材の紫外線への曝露を変化させる。

オゾン層破壊、紫外線、気候変化が相互に及ぼす影響に関する我々の知見は、前回の 4 ヶ年アセスメント以来向上しているものの、これらの影響の全容と規模を正確かつ定量的に評価することを難しくしている多くの不確実性が残っている。特筆すべきは、気候が変化し続ける中で、地表の紫外線が将来どのように変化するのか、成層圏のオゾンと紫外線の同時変化によって、気候変動の環境と人間への影響がどの程度加減されるのかは不明である。これらの要因は、日射管理や気候への介入を伴う可能性のある将来のシナリオを考慮すれば、特に重要である。このような不確実性があるにもかかわらず、モントリオール議定書が、成層圏オゾン層破壊の有害な影響から、人間、水圏・陸上生態系、大気質、天然および人工の素材を保護する上で極めて重要であったことは、この 4 ヶ年アセスメントから明らかである。

成層圏オゾン層を保護し、気候変化の影響の一部を緩和することで、モントリオール議定書は国連の持続可能な開発目標（SDGs）の実施に貢献し続けている。具体的には、EEAP は 17 個中 11 個の SDGs（Box 2）のうち 21 の目標に取り組むことで、モントリオール議定書とその改正の SDGs との緊密な提携を示している。これらの SDGs は、気候変化、大気質と水質、生物多様性と生態系、汚染物質と素材、人間の健康といった分野の目標に取り組んでいる。このように、モントリオール議定書は、人間の健康を守り、陸上と水中の健全で多様な生態系を維持することによって、持続可能性に関して広範な重要性を擁している。

Box 2. 以下の国連持続可能な開発目標（SDGs）とその具体的な目標は、2022 年 EEAP4 カ年アセスメントで取り上げられている。

SDG	目標
 2 飢餓をゼロに	2.3 小規模食糧生産者の生産性の向上 2.4 持続可能な食料生産システムを確立する 2.5 農耕動植物の遺伝的多様性を維持する
 3 すべての人に健康と福祉を	3.3 感染症の流行を終わらせる 3.9 大気・土壌・水質の汚染による死亡者数を減らす
 6 安全な水とトイレを世界中に	6.1 安全な飲料水を利用可能にする 6.3 水質汚染を減らす 6.6 水関連の生態系を守る
 7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに	7.A クリーンエネルギーをめぐる国際協力の強化
 9 産業と技術革新の基盤をつくろう	9.4 持続可能な産業への転換
 11 住み続けられるまちづくりを	11.5 災害による死者を減らす 11.6 都市の環境上の悪影響を小さくする
 12 つくる責任 つかう責任	12.4 化学物質や廃棄物の環境に配慮した管理を実現する 12.5 廃棄物の発生を削減する
 13 気候変動に具体的な対策を	13.2 気候変動対策を政策に統合する 13.3 気候変動の緩和策に関する教育を改善する
 14 海の豊かさを守ろう	14.1 海洋汚染を減らす 14.3 海洋酸性化の影響を最小限に抑える
 15 陸の豊かさも守ろう	15.1 陸上生態系の保全を確保する 15.3 砂漠化を食い止める
 17 パートナリシップで目標を達成しよう	17.14 持続可能な開発のための政策の一貫性を強める

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. 2022. 令和 4 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. 2012-2022. 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
- Pageon 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.
- UNEP. 2022. Environmental effects and Interactions of Stratospheric Ozone Depletion, UV Radiation, and Climate Change: 2022 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 strtspheric 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
- WMO. 2022. Scientific assessment of ozone depletion: 2022
- 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 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
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 Erythemat 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 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