

第 I 部 オゾン層破壊物質濃度の経年変化

クロロフルオロカーボン類（CFC-11、CFC-12、CFC-113など。塩素等ハロゲン元素を含んだ炭素化合物であるハロカーボンの一種。以下CFC類と表記する）は成層圏オゾン破壊する物質であり、「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」によりその生産等が規制されている。ここでは、気象庁が1990年から綾里（岩手県大船渡市）で観測している大気中のCFC類の地上での濃度の観測結果と、温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）に報告された世界のCFC類濃度の観測結果を示す。温室効果ガスとしてのCFC類については「解説3」で述べる。

第 1 章 綾里での大気中のクロロフルオロカーボン類濃度の経年変化

綾里におけるCFC-11、CFC-12およびCFC-113濃度の経年変化を図 I 1-1に示す。季節変化は認められない。CFC-11濃度は、1993～1994年の約270 pptをピークとして減少傾向にある。CFC-12濃度は1995年まで増加し、その後もごく緩やかに増加していたが、2005年頃をピークに減少している。CFC-113濃度は2001年頃までにごく緩やかな増加が止まり、その後減少傾向がみられる。2010年の年平均濃度はCFC-11が243ppt、CFC-12が534ppt、CFC-113が77ppt（いずれの値も速報値）であった。

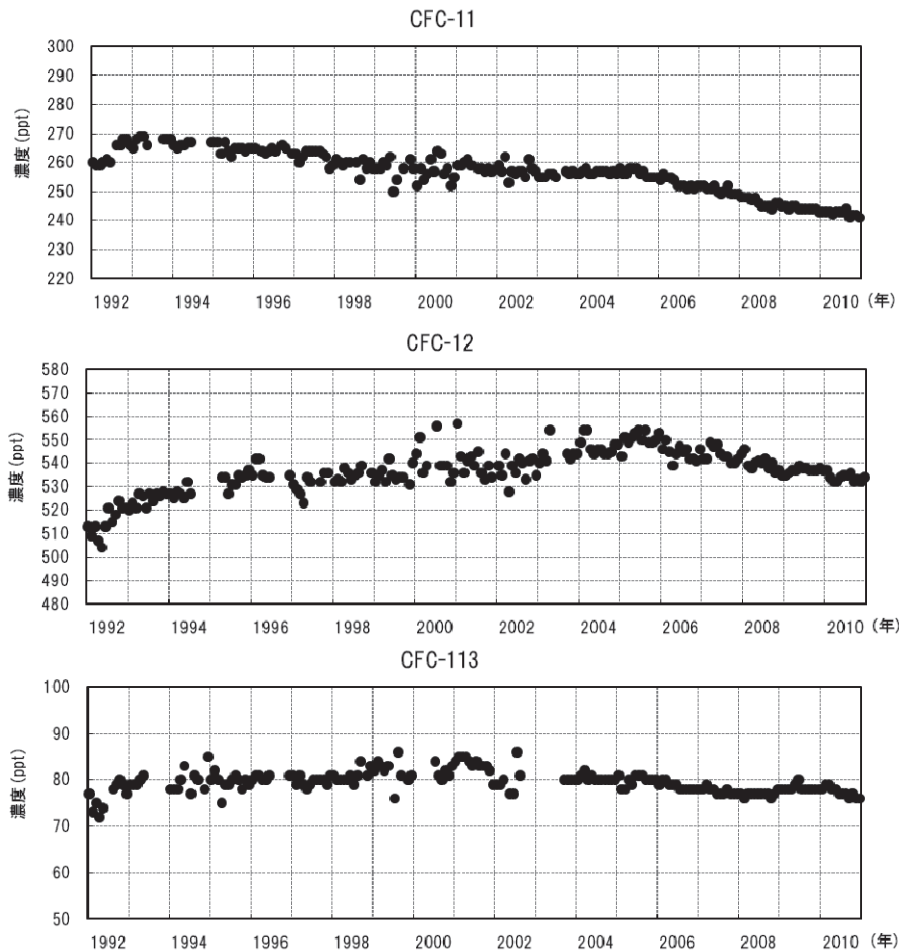


図 I 1-1：岩手県大船渡市綾里における大気中のクロロフルオロカーボン類濃度の経年変化
綾里における大気中のCFC-11（上）、CFC-12（中）、CFC-113（下）の地上での月平均濃度の経年変化を示す。なお、データのない期間は、主に観測機器の更新や較正作業のための欠測である。また、観測精度を向上させるため、2003年9月から放射線源を用いた電子捕獲型検出器（ECD）を搭載したガスクロマトグラフを導入したことにより、観測濃度データのばらつきがそれ以前と比較して少なくなっている。

第2章 世界の大気中のクロロフルオロカーボン類濃度の経年変化

世界各地で観測された大気中のCFC類の濃度の変化（2009年まで）を図I 2-1に示す。いずれも1980年代に急速に濃度が増加し、1990年代以降は増加の緩和または減少傾向がみられる。工業生産による増加とモントリオール議定書（1989年1月発効）による生産規制の効果が示されていると解釈できる。

物質ごとにみると、CFC-11が北半球で1992～1993年頃、南半球で1993～1994年頃を境に、増加から緩やかな減少傾向に転じている。CFC-12は、1990年頃から増加率が減少し始め、現在ではほぼ変動がない。CFC-113はCFC-11と同様の傾向を示し、北半球で1993～1994年頃を、南半球では1997年前後を境として緩やかな減少傾向に転じている。これらの傾向の違いは、放出量の減少の度合いとともに、それぞれの物質の大気中の寿命（「解説1」表E1-1参照）を反映していると考えられる。

なお、放出されたCFC類などのオゾン層破壊物質は、大気の流れにより成層圏まで輸送され、太陽紫外線により成層圏で光解離し塩素原子あるいは臭素原子を放出する。これらの原子が元になり成層圏オゾンの破壊サイクルが起きる。成層圏の塩素原子・臭素原子の濃度を用いて、等価実効成層圏塩素（EESC）というオゾン層破壊の指標が用いられている（「解説2」参照）。

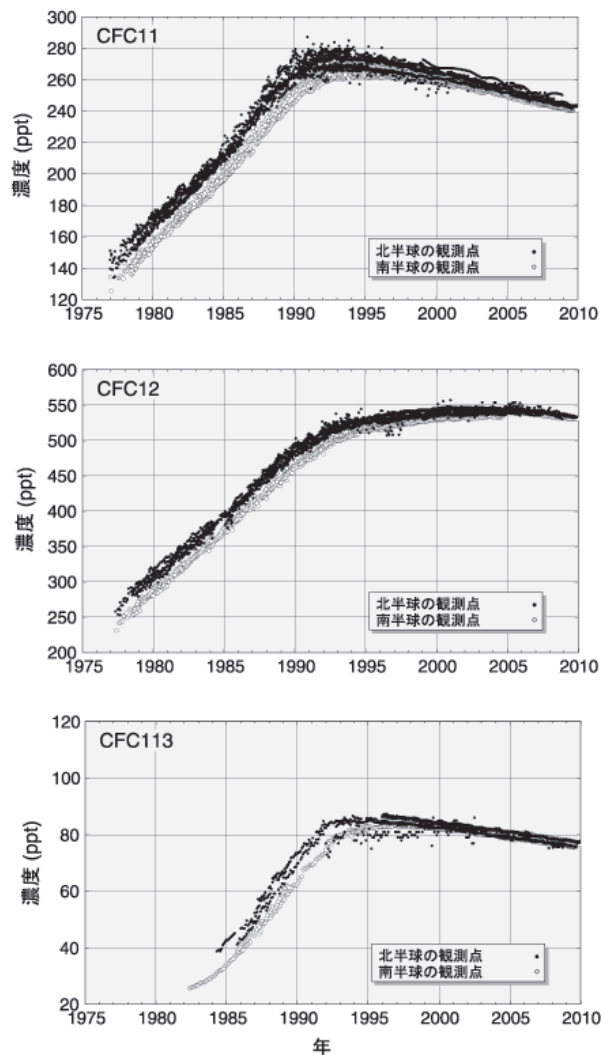


図 I 2-1：世界の観測点での大気中のクロロフルオロカーボン類濃度の経年変化

上から CFC-11、CFC-12、CFC-113 の経年変化を示す。観測データとして、温室効果ガス世界資料センター（WDCGG）に報告されたデータを使用している。

解説1 オゾン層破壊物質について

ハロカーボン類は、フッ素、塩素、臭素、ヨウ素を含んだ炭素化合物の総称であり、その多くは本来自然界には存在しない人工物質である。CFC類（CFC-11、CFC-12など）はハロカーボンの一種で、オゾン層破壊物質である。そのほか、四塩化炭素（ CCl_4 ）、ハイドロクロロフルオロカーボン類（HCFC類）1,1,1-トリクロロエタン（別名メチルクロロホルム CH_3CCl_3 ）などが塩素原子をもつ主要なオゾン層破壊物質として挙げられる（表E1-1）。これらは、冷蔵庫、エアコン、発泡剤、スプレーの噴射剤、金属や電子部品の洗浄などの用途に利用されてきた。臭素原子を含むオゾン層破壊物質としては、ハロンと臭化メチルなどがあり、ハロンは主に消火剤などに、臭化メチルは農業くん蒸剤として利用されている。なお、表E1-1で、塩化メチルと臭素系の極短寿命ガスの大部分、臭化メチルの一部は、海洋や生態系など自然から発生したものである。

大気へ放出されたオゾン層破壊物質の寿命は、大気中での化学反応や大気から除去される割合などから決まる。塩素・臭素原子を含むオゾン層破壊物質の大気中での寿命は1～100年程度である。特にCFC-12は約100年と長く、一旦放出されると長い間大気中に残留し続ける。一方、寿命の短い物質は成層圏に輸送されるまでの間に破壊されてしまうため、オゾン層破壊への寄与は小さい。世界全体のオゾン層破壊物質の大気中濃度は、それぞれの大気中での寿命とそれまでの排出量によって決まることになる。

表E1-1の中の「オゾン層破壊係数」とは、オゾン層破壊物質が成層圏のオゾンを破壊する効果をあらかず数値である。この係数は物質ごとに質量あたりで計算され、CFC-11の係数を基準とした相対的な値である。ハロン1301とハロン1211は、オゾン破壊係数がかなり大きい。これは、臭素原子が関与する成層圏オゾンの分解反応サイクルが塩素原子のそれよりも約60倍効率的に作用するためである。

表E1-1：主なオゾン層破壊物質の大気中寿命、排出量、オゾン層破壊係数

人間活動と自然発生源を含む。WMO（2011）から抜粋。

| | 物質名 | 大気中 寿命（年） | 2008年の世界全体の 排出量（千トン） | オゾン層 破壊係数 |
|-----|---|--------------|-------------------------|--------------|
| 塩素系 | CFC-12 | 100 | 41～99 | 0.82 |
| | CFC-113 | 85 | 3～8 | 0.85 |
| | CFC-11 | 45 | 52～91 | 1 |
| | 四塩化炭素（ CCl_4 ） | 26 | 40～80 | 0.82 |
| | HCFC類 | 1～17 | 385～481 | 0.01～0.12 |
| | 1,1,1-トリクロロエタン （ CH_3CCl_3 ） | 5 | <10 | 0.16 |
| | 塩化メチル | 1 | 3600～4600 | 0.02 |
| 臭素系 | ハロン1301 | 65 | 1～3 | 15.9 |
| | ハロン1211 | 16 | 4～7 | 7.9 |
| | 臭化メチル（ CH_3Br ） | 0.8 | 110～150 | 0.66 |
| | 極短寿命ガス（ CHBr_3 など） | <0.5 | （推計が不確実） | （推計が不確実） |

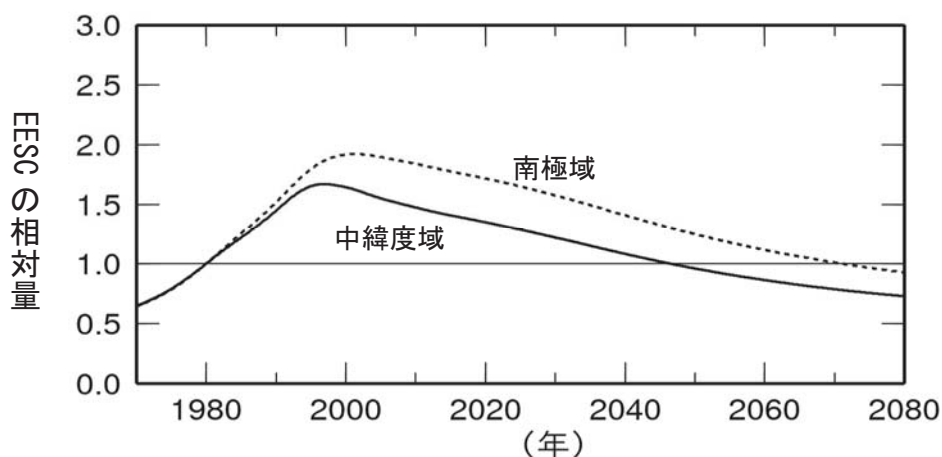
解説2 等価実効成層圏塩素 (EESC)

オゾン層破壊物質は、地表で排出されたのち大気の流れにより成層圏に達し、太陽光に含まれる紫外線により光解離され、オゾン層破壊を引き起こす塩素原子や臭素原子を放出する。放出された成層圏中の塩素原子や臭素原子の濃度は、オゾン層破壊物質による成層圏オゾンの破壊の指標となる。臭素原子分はそのオゾン破壊効率が非常に高いので、その分を塩素原子分に換算し、等価実効成層圏塩素 (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine: 以下EESCと表記) と指標化する。

EESCは、オゾン層破壊物質が成層圏に到達した際の濃度、成層圏で紫外線によって光解離される度合い、臭素原子と塩素原子のオゾン破壊効率などを考慮して計算される。オゾン層破壊物質が成層圏に到達する量は、オゾン層破壊物質の地上大気濃度の観測結果、過去の放出量および今後の放出量の見通しのほか、オゾン層破壊物質の寿命や地表から成層圏に達するまでの平均的な年数の推定値などをもとに算出されている。成層圏へ輸送された塩素・臭素は、3～6年程度かけて成層圏のさまざまな場所に輸送されるが、領域によってその年数は異なる。

図E2-1は、中緯度域と南極域におけるEESCの現在までの推移と将来の予測値を、1980年の値を1とした相対的な量として示したものである。EESCは、20世紀後半に増加していたが、モントリオール議定書による規制の効果により、中緯度域では1990年代半ばに、南極域ではそれよりやや遅れて2000年頃にピークに達し、その後減少に転じている。今後、モントリオール議定書が遵守されればEESCは徐々に減少するが、CFC類などの主なオゾン層破壊物質の大気中での寿命が長い(10～100年程度)のために、その減少は緩やかである。中緯度域では、21世紀半ば頃には1980年のレベルまで減少すると見込まれる。一方、南極域では、オゾン層破壊物質が到達するまでの年数が中緯度域よりも長くなることなどから、1980年レベルに戻るのは中緯度域に比べ約25年遅くなると見込まれている。

なお、世界全体(第II部第1章)および日本上空(第II部第2章)のオゾン量の長期変化傾向の算出では中緯度域のEESCを使用し、南極域のオゾン量の長期変化傾向の算出(第II部第3章)では南極域のEESCを用いて計算している。



図E2-1: 等価実効成層圏塩素 (EESC) の経年変化

1980年を1とした相対的な値として示した。WMO(2011)と同様に、対流圏から成層圏に入ったオゾン層破壊物質が中緯度および南極域まで塩素・臭素原子として到達するまでの時間を、それぞれ3年、5.5年として算出。また、臭素原子のオゾン破壊効率を中緯度では60倍、高緯度では65倍とした。EESCの数値は米国航空宇宙局 (NASA) から提供。

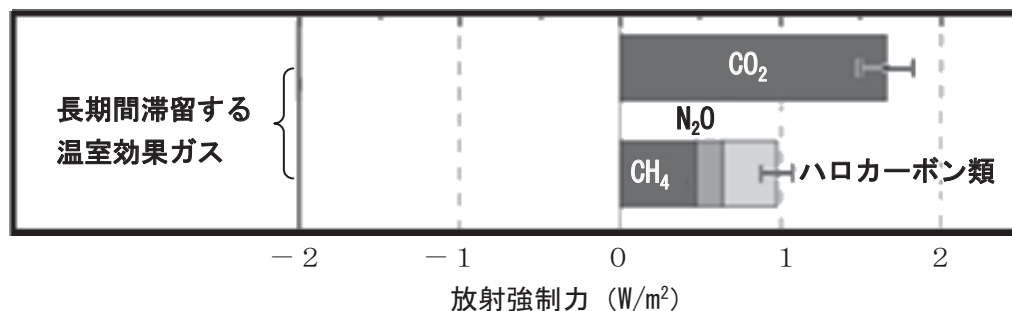
解説3 オゾン層破壊物質と温室効果

オゾン層破壊物質であるCFC類は、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などと同様温室効果ガスという性質ももつ。温室効果ガスがもつ地球温暖化に対する単位質量あたりの効果をあらわす指標として、地球温暖化係数が用いられる。この係数は、温室効果ガスの寿命を考慮して特定期間（例えば100年）について積算した効果となっており、二酸化炭素の値を1とした相対値として表現される。CFC類の場合、100年間で評価した地球温暖化係数は4,750～14,400（IPCC, 2007）であり、単位質量あたりでは二酸化炭素と比較して非常に大きな温室効果をもつ。そのほか、ハロンやハイドロクロロフルオロカーボン類（HCFC類）なども高い地球温暖化係数をもつ。

図E3-1は、工業化時代が始まる以前の1750年を基準として、2005年の温室効果ガスの放射強制力を示したものである（IPCC, 2007）。放射強制力とは、気候に及ぼす要因が変化したときに、地球-大気システムのエネルギーバランスが放射を通じて受ける影響を測る尺度である。放射強制力が正の場合には大気の温暖化をもたらす、負の場合は大気の寒冷化をもたらす。ハロカーボン類全体の放射強制力は、二酸化炭素に比べると小さい。これは、オゾン層破壊物質を含むハロカーボン類全体の大気中濃度は二酸化炭素と比較して微量であるため、地球温暖化係数が大きくても、二酸化炭素より放射強制力は小さくなるためである。ただし、ハロカーボン類の放射強制力はメタンに匹敵する大きさであり、微量でも地球温暖化への影響が大きい。

モントリオール議定書に基づいた規制により、大気中のCFC類濃度は1990年代以降緩やかな減少傾向にある。2010年におけるCFC-12とCFC-11濃度は、議定書がなかった場合に比べて半分以下と見込まれている。議定書によって削減されたオゾン層破壊物質の排出量は、二酸化炭素の量に換算すると、1年あたり約100億トンに相当する割合で減少したことになる。これは、先進国の温室効果ガス排出量削減目標を定めた京都議定書の第一約束期間（2008～2012年）の削減目標（二酸化炭素換算で1年あたり約20億トン）の5～6倍に相当する。このように、モントリオール議定書および日本のオゾン層保護法による規制は、オゾン層保護という本来目的だけではなく、地球温暖化の防止にも貢献している。これは、1992年の気候変動枠組条約に先立ち1987年にモントリオール議定書の採択がなされた結果であり、モントリオール議定書で規制されているCFC類は、京都議定書の対象物質から除外されている。

また、CFC類やHCFC類の代替物質として、オゾン層を全く破壊しないハイドロフルオロカーボン類（HFC類）、パーフルオロカーボン類（PFC類）、六フッ化硫黄（SF₆）などが利用されている。しかし、これらの物質は、強力な温室効果ガスでもあり、京都議定書において削減対象となっている。オゾン層破壊物質の生産等を削減しつつ、地球温暖化を防ぐ観点から、その代替として利用されるHFC類などの生産・排出を削減することもまた求められている。



図E3-1：主な温室効果ガスによる放射強制力

これらの値は、工業化時代が始まる以前の1750年を基準とした2005年の放射強制力を示している。棒グラフに付いた細い黒横線は、個々の値の不確か性の範囲を示す。IPCC（2007）より引用。