

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。フッ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）は成層圏オゾンを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。

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2005年頃まで緩やかに増加していたが、その後は緩やかな減少傾向にある。CFC-113濃度は2001年頃からごく緩やかな減少傾向がみられたが近年はほとんど変化していない。2009年の年平均濃度は、CFC-11が246 ppt、CFC-12が537 ppt、CFC-113 が78 pptであった。

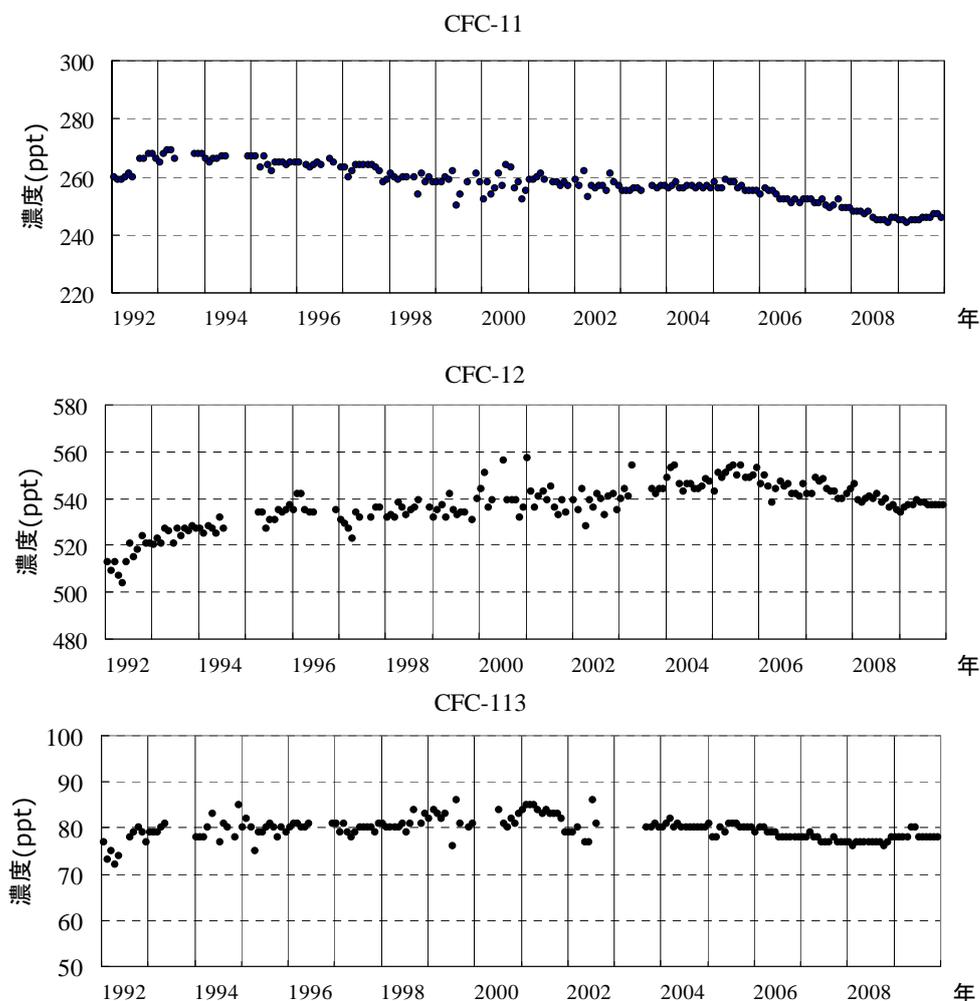


図 I 1-1： 岩手県大船渡市綾里における大気中のクロロフルオロカーボン類濃度の経年変化
綾里における大気中の CFC-11（上）、CFC-12（中）、CFC-113（下）の地上での月平均濃度の経年変化を示す。なお、データのない期間は、主に観測機器の更新や較正作業のために欠測となっている。また、観測精度を向上させるため、2003年9月から放射線源電子捕獲型検出器（ECD）を搭載したガスクロマトグラフを導入したことにより、それ以前と比較して観測濃度データにばらつきが少なくなっている。

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（2008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年頃から増加傾向が減少し始め、近年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年頃を境として緩やかな減少傾向に、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・臭素原子の濃度はオゾン層破壊の指標となる（等価実効成層圏塩素。「解説2」参照）。

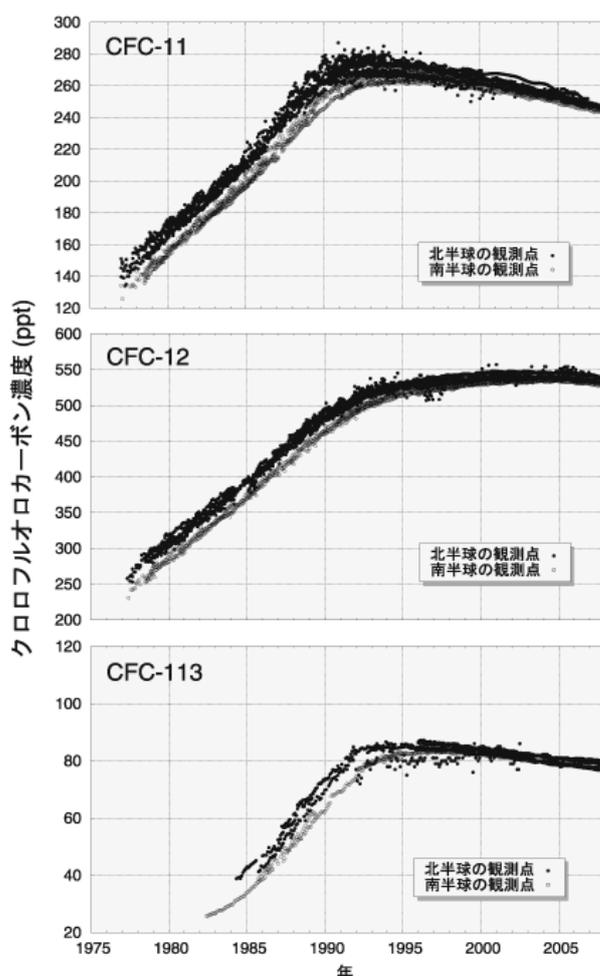


図 I 2-1：世界の観測点での大気中のクロロフルオロカーボン類濃度の経年変化

上から CFC-11、CFC-12、CFC-113 の経年変化を示す。観測データは、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。クロロフルオロカーボン類（CFC-11、CFC-12など。以下CFC類と表記）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（HCFC）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・臭素系の極短寿命ガスの大部分と臭化メチルの一部は海洋や生態系など自然からの排出分が含まれている。

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、大気拡散あるいは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。オゾン層破壊物質の世界平均としての大気中濃度は、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わす数値である。この係数は物質毎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1211とハロン1301は、オゾン破壊係数がかなり大きい。これは、成層圏オゾンの破壊にかかわる化学反応において、臭素原子が塩素原子よりも約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(2007)から引用。

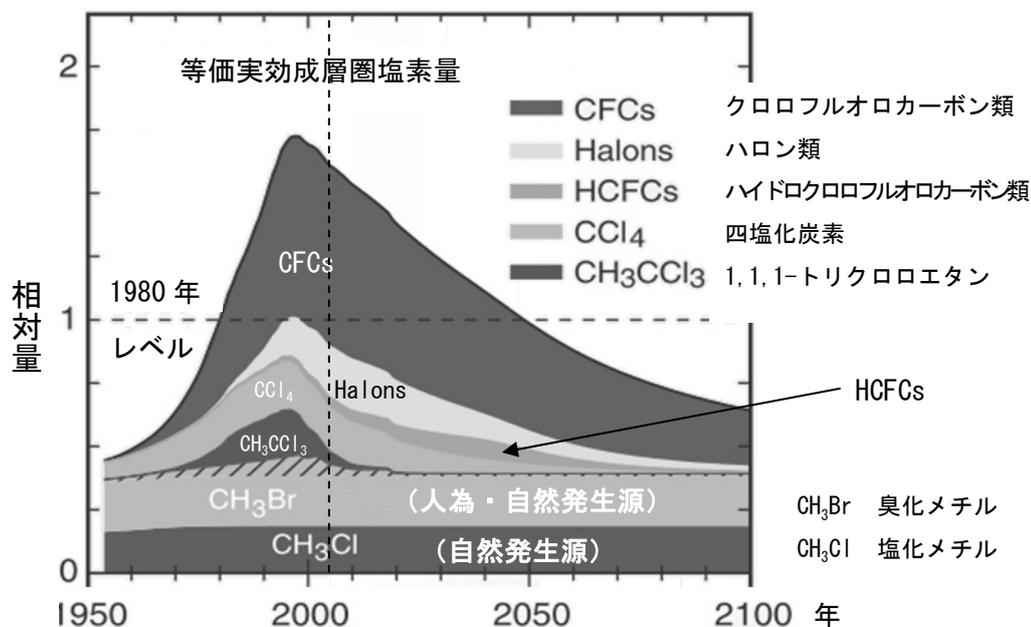
| | 物質名 | 大気中 寿命 (年) | 2003年の世界全体の 排出量 (千トン) | オゾン層 破壊係数 |
|-----|---|---------------|--------------------------|--------------|
| 塩素系 | CFC-12 | 100 | 101～144 | 1 |
| | CFC-113 | 85 | 1～15 | 1 |
| | CFC-11 | 45 | 60～126 | 1 |
| | 四塩化炭素 (CCl_4) | 26 | 58～131 | 0.73 |
| | HCFC | 1～26 | 312～403 | 0.02～0.12 |
| | 1,1,1-トリクロロエタン (CH_3CCl_3) | 5 | ～20 | 0.12 |
| | 塩化メチル | 1.0 | 1700～13600 | 0.02 |
| 臭素系 | ハロン1301 | 65 | ～3 | 16 |
| | ハロン1211 | 16 | 7～10 | 7.1 |
| | 臭化メチル (CH_3Br) | 0.7 | 160～200 | 0.51 |
| | 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、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り、等価実効成層圏塩素 (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine: 以下EESCと表記) と呼ばれる。ただし、臭素原子分は、そのオゾン破壊効力をもとに塩素原子分に換算している。

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などをもとに算出されている。

図E2-1は、中緯度における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 (WMO, 2007)。オゾン層破壊物質ごとに、それぞれの寄与を積み上げ式に表示している。それぞれの物質の寄与を積算した値が、EESCの値となる (図E2-1の一番上の線 (太線))。EESCは、1990年代半ばにピークに達し、以後モントリオール議定書が遵守されれば徐々に減少し、21世紀半ば頃には1980年のレベルまで減少すると予測されている。なお極域では、中緯度よりもオゾン層破壊物質が到達するまでの年数が長くなることなどから、1980年レベルに戻るのは2065年頃と中緯度より15年程度遅くなると見込まれている。物質ごとにみても、EESCに対する寄与はクロロフルオロカーボン類 (CFC類と表記) が最も大きい。1原子あたりのオゾン破壊の効率は塩素原子が臭素原子よりも小さいものの、CFC類の方が大気中に多く存在するためである。また、CFC類やハロンは寿命が長いため (「解説1」参照)、モントリオール議定書による規制後も減少は緩やかである。一方、1,1,1-トリクロロエタン (CH_3CCl_3) は寿命が5年と短いため、1990年代後半以降に急速に減少した。



図E2-1 等価実効成層圏塩素 (EESC) の推移図

オゾン層1980年を1とした相対的な値。各物質の寄与分を濃淡の面積として表現されている。縦の点線より右側は将来の推定値。WMO(2007)から引用。

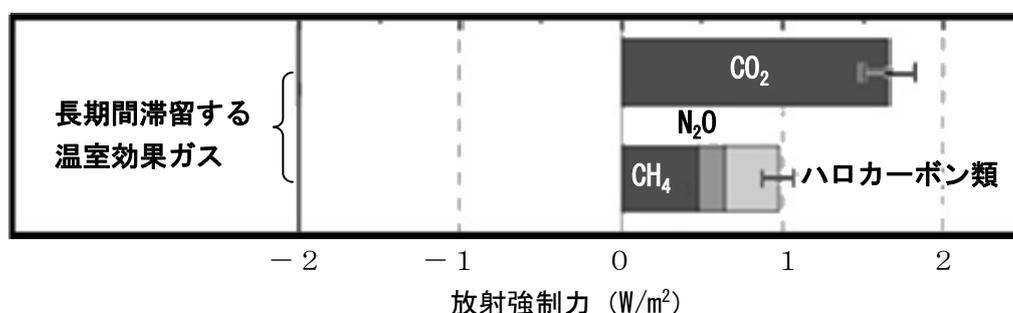
解説3 オゾン層破壊物質と温室効果

オゾン層破壊物質であるクロロフルオロカーボン類（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）の積算した効果となっており、二酸化炭素の値に対して相対的な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（以下HCFC類と表記）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年を基準とした、2005年の放射強制力を示したものである（IPCC, 2007）。放射強制力とは、温室効果ガスなど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どのように影響を受けるかを測る尺度である。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、ハロカーボンの放射強制力はメタンと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ともなう規制により、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110億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及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。

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（CFC類はモントリオール議定書で規制されているが、京都議定書の削減対象には含まれない）。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。棒グラフについての細い黒線は、個々の値の不確実性の範囲を示す。IPCC(2007)より引用。