

## 第1部 オゾン層の状況 参考資料

- [参考資料 1. 南極域上空の平均気温等の推移\(2024年\)](#)
- [参考資料 2. 成層圏におけるオゾンの生成と消滅](#)
- [参考資料 3. QBOによるオゾン変動](#)
- [参考資料 4. オゾン層の日周期変動](#)
- [参考資料 5. ブリュウワ・ドブソン循環](#)
- [参考資料 6. オゾン層観測手法の種類](#)
- [参考資料 7. オゾン層の観測ネットワーク](#)
- [参考資料 8. オゾンデータの管理・公表](#)
- [参考資料 9. 解析に用いた衛星観測オゾンデータ](#)
- [参考資料 10. 2024年の月平均オゾン全量と偏差\(%\)の地球規模の分布](#)
- [参考資料 11. 1979～2024年の南半球の月平均オゾン全量分布\(10月\)](#)
- [参考資料 12. 地上観測による南極域でのオゾン全量推移](#)
- [参考資料 13. 成層圏数値モデルー化学気候モデルと化学輸送モデル](#)

## 第2部 特定物質等の大気中濃度 参考資料

- [参考資料 1. 特定物質の特徴と用途](#)
- [参考資料 2. 都道府県・政令指定都市のオゾン層破壊物質等の観測状況](#)
- [参考資料 3. 成層圏における特定物質の高度分布](#)

## 第3部 太陽紫外線の状況 参考資料

- [参考資料 1. 紫外線対策へのUVインデックスの活用方法](#)
- [参考資料 2. 実効オゾン全量とUV-B強度の関係](#)
- [参考資料 3. 雲量による紫外線量の割合の変化](#)
- [参考資料 4. 紫外線による人の健康への影響](#)
- [参考資料 5. 紫外線による陸域生態系への影響](#)
- [参考資料 6. 紫外線による水圏生態系への影響](#)
- [参考資料 7. 紫外線による材料の損傷](#)
- [参考資料 8. オゾン層破壊と大気質への影響](#)

## 第4部 巻末資料

- [1. オゾン層保護対策](#)
  - [1-1. オゾン層破壊物質等の概要](#)
  - [1-2. 国際的なオゾン層保護対策](#)
  - [1-3. 我が国におけるオゾン層保護対策](#)
  - [1-4. オゾン層保護対策の効果](#)
- [参考資料 1. クロロカーボンの性質および用途](#)

## 第1部 オゾン層の状況 参考資料

### 参考資料1. 南極域上空の平均気温等の推移（2024年）

南極オゾンホール形成に大きな役割を果たす極成層圏雲は、 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の低温状態が持続される場合に生成される。

図1-資-1に、2024年の南極域（南緯60度以南の領域）の上空の下部成層圏（50hPa）の平均気温及び $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の面積の推移を示す。

2024年の南極域の50hPaの日平均気温\*は、6月中旬から9月上旬まで $-78^{\circ}\text{C}$ 以下となり、過去の平均値（1979～2023年）と同程度で推移した。 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の面積の推移を見ると、7月中旬から9月中旬は過去の平均値より小さく推移し、特に8月上旬には過去の最低値程度まで小さくなった。この要因としては、南極成層圏に形成される極渦が偏在し弱まったことで、極渦内部の気温が例年より高くなったと考えられる。

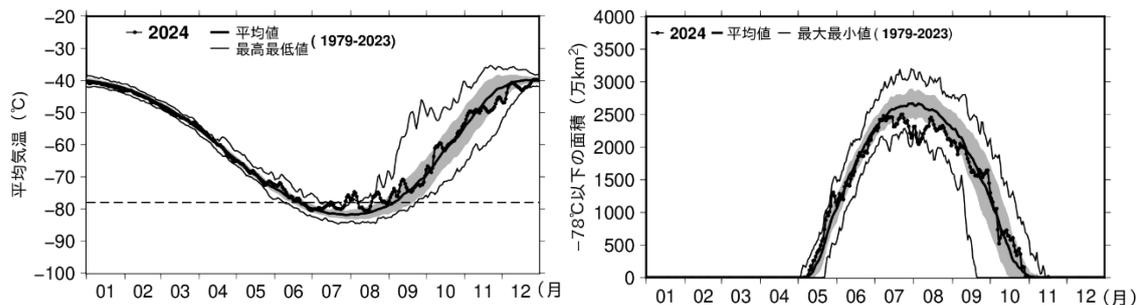


図1-資-1 南極域上空の下部成層圏の平均気温及び気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積の推移（2024年1月～2024年12月）

南緯60度以南の50hPa（高度約20km）面における日別の平均気温と気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積の推移。  
 ●印は2024年の値を示す。陰影中の太実線は1979～2023年の平均値。陰影外の細実線は同期間の最高（最大）値及び最低（最小）値。陰影は標準偏差の範囲。

図中の横の破線は極成層圏雲出現の目安である $-78^{\circ}\text{C}$ 。

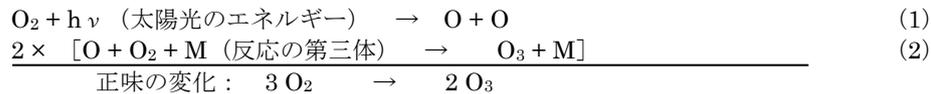
（出典）気象庁提供

\* 「オゾン層・紫外線の年のまとめ（2011年）」までは、南極下部成層圏として30hPaの気温データを用いていた。しかし、WMOの報告等では50hPaのデータが用いられることが多く、最大オゾン欠損量との相関も良いことが確認されているため、「オゾン層・紫外線の年のまとめ（2012年）」よりこれを用いている。

## 参考資料2. 成層圏におけるオゾンの生成と消滅

### 成層圏オゾンの生成・消滅反応

大気中でオゾン (O<sub>3</sub>) を生成する唯一の反応は、何らかの作用によって大気中に供給された酸素原子 (O) と大気の主成分の一つである酸素分子 (O<sub>2</sub>) との結合反応 (反応 (2)) である。成層圏で正味の化学変化としてオゾンの生成をもたらすための酸素原子の供給源は、エネルギーの高い太陽紫外線が到達する成層圏中上部での酸素分子の光分解反応 (反応 (1)) である。



ここで、Mは窒素分子又は酸素分子で、反応によって生じた化学エネルギーを持ち去り、生成したオゾンを安定化して再び酸素原子と酸素分子に解離しないようにする役割を担っている。

オゾンは太陽の光を吸収して解離し、酸素原子を生成する (反応 (3)) \*。オゾンの光分解によって生成した酸素原子は直ちに反応 (2) によってオゾンを再生するので、反応 (3) と (2) では正味の化学変化 (オゾンの生成・消滅) は起こらない。酸素分子の光分解 (反応 (1)) によって酸素原子が生成した場合は、正味としてオゾンの生成をもたらすのと、対照的である。



ここで示した反応 (3) と (2) は、成層圏でのオゾンを取り巻く反応の中で最も活発に起こっている反応である。この2つの反応は正味の変化としては何らの化学変化も引き起こさないものの、紫外線を熱に変換する反応 (成層圏の熱源としての反応) に相当しており、周りの大気を暖める役割を果たしている。

反応 (3) によって生成された酸素原子の大部分は上述のとおり反応 (2) によってオゾンを再生するが、ごく一部はオゾンと反応することで酸素分子にもどる (反応 (4))。これが成層圏におけるオゾンの分解反応である。



反応 (3) と (4) の正味の化学変化は、反応 (1) と (2) による正味の化学変化 (オゾンの生成) のちょうど逆の変化になっている。

成層圏でのオゾンの生成・消滅の基本的な部分は、反応 (1) ~ (4) によって構成される一連の化学反応群で説明される。反応 (1) ~ (4) は酸素のみを考慮した化学反応群であり、純酸素機構あるいはチャップマン機構と呼ばれている。

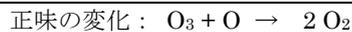
チャップマン機構ではオゾンの分解速度は反応 (4) に支配される。反応 (4) は気温が低くなると効率は悪くなるため、何らかの理由で成層圏の気温が低下するとオゾンの分解速度が低下し、その結果、オゾン量の増加をもたらす。一方、オゾン量の増加は反応 (3) と (2) を通

\* オゾンの光分解は、紫外線のみではなく、可視光 (人間の目に見える光) や赤外線の一部 (理論的には波長 1180nm より短波長の光) でも起こる。

して成層圏をより加熱する（気温を上げる）方向に働くことで、オゾンの分解速度の低下は緩和される\*（気温の変化を介したフィードバックの存在）。

### オゾン分解反応サイクル

成層圏では、反応（3）と（4）によるオゾン分解反応以外にも、成層圏に存在する極微量の活性種が関与するオゾン分解反応がある。オゾン分解反応に関与する活性種としては、水素酸化物（ $\text{HO}_x$ と総称。H、OH及び $\text{HO}_2$ ）、窒素酸化物（ $\text{NO}_x$ と総称。NO及び $\text{NO}_2$ ）、塩素酸化物（ $\text{ClO}_x$ と総称。Cl及びClO）、臭素酸化物（ $\text{BrO}_x$ と総称。Br及びBrO）がある。これらの活性種が極微量であるにもかかわらずオゾン層でのオゾンの消失に影響を及ぼし得るのは、これらの活性種の関与するオゾン分解反応が連鎖反応になっているためである。これまでに幾つかのオゾン分解反応が提案されているが、その中でも成層圏中上部で重要となる反応は次に示す反応である。



ここで、XはH、OH、NO、Cl又はBrである。反応（5）と（6）は、オゾン分解反応サイクルを構成しており、例えばX=Clの場合、 $\text{ClO}_x$ サイクルと呼ばれている\*\*。 $\text{ClO}_x$ サイクルは、MolinaとRowlandのクロロフルオロカーボン（CFC）によるオゾン層破壊の予見として有名である\*\*\*。 $\text{ClO}_x$ サイクルの場合、反応（5）によって一酸化塩素（ClO）に変換された塩素原子（Cl）が反応（6）によって再生され、再び反応（5）に関与することで、連鎖的にオゾンを分解する\*。なお、 $\text{ClO}_x$ サイクルをはじめとする $\text{XO}_x$ サイクルの正味の化学変化は反応（4）と同じ\*\*である。

成層圏では、下部成層圏により多くのオゾンが存在している。そのため、上部・下部成層圏のそれぞれの高度域に存在するオゾン量に対し、同じ割合（例えば1%の減少）のオゾンが消失すると仮定すると、下部成層圏でのオゾンの消失の方がオゾン全量の変化により大きく影響を及ぼすことになる。ところが、下部成層圏においては、酸素原子との反応を含む反応（5）と（6）で表した $\text{XO}_x$ サイクルはオゾン分解反応として十分に機能しない。この理由は、反応（5）と（6）で表される $\text{XO}_x$ サイクルにおいてオゾンの分解効率には酸素原子の濃度に依存するが、酸素原子の濃度は高度が下がるにつれて著しく減少するため、下部成層圏では効率的なオゾン

\*逆に何らかの理由で成層圏の気温が上昇した場合は、オゾンの分解速度が増大し、オゾン量の減少をもたらす。オゾン量の減少は成層圏の加熱を抑える（気温を下げる）方向に働くことで、オゾンの分解速度の増大は緩和される。

\*\*同様に、X=H又はOHの場合は $\text{HO}_x$ サイクル、X=NOの場合は $\text{NO}_x$ サイクル、X=Brの場合は $\text{BrO}_x$ サイクル、と呼ばれる。また、オゾン分解反応サイクルは総称として、 $\text{XO}_x$ サイクルと呼ばれている。

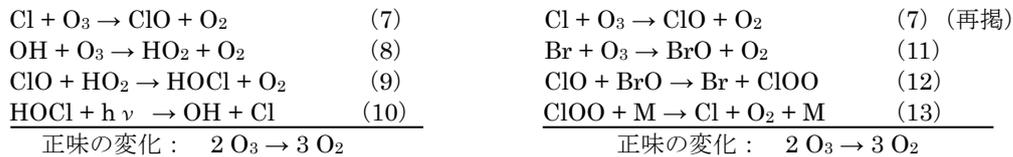
\*\*\*「CFCによるオゾン破壊」として表現されるが、CFCが直接オゾンと反応してオゾンを分解する訳ではない。CFCはCl原子を成層圏に運ぶ「運び屋」の役割を担っている。成層圏に達したCFCは、太陽紫外線による光分解反応並びにその後続の化学反応によってCl原子を遊離する。

\*CFCの光化学反応では、Cl原子だけでなく、F原子も生成する。しかし、 $\text{FO}_x$ の効率は極めて悪く、オゾン分解には寄与しない。これは、F原子が生成しても、 $\text{CH}_4$ や $\text{H}_2\text{O}$ との反応によって容易にHFに変換され、再びF原子に活性化されることはないことに起因している。HClに貯留されたCl原子が反応（16）によって活性化されるのとは対照的である。

\*\*オゾン分解反応サイクルは「触媒反応サイクル」とも呼ばれている。例えば、 $\text{ClO}_x$ 触媒サイクルなど。

分解を引き起こすのに十分な濃度の酸素原子が存在しないためである。

このため、下部成層圏でのオゾン分解では酸素原子との反応を必要としないオゾン分解反応サイクルの存在が必要であり、極微量な活性種同士の反応などが重要となる<sup>\*\*\*</sup>。下部成層圏において塩素酸化物が関係するオゾン分解反応サイクルの例を以下に示す。



$\text{HO}_2$  や  $\text{BrO}$  は極微量な活性種ではあるものの、下部成層圏におけるそれらの濃度は酸素原子の濃度に比べると高く、そのため  $\text{ClO}$  とは異なる反応サイクルに属するとされていた  $\text{HO}_2$  や  $\text{BrO}$  との相互反応を含む上記のオゾン分解反応サイクルが有効となる。

大気中にはこれらの連鎖反応に関与する活性種を除去する反応（連鎖を停止する反応）が存在するため、連鎖反応が無限に続くわけではない。例えば塩素酸化物 ( $\text{Cl}$  及び  $\text{ClO}$ ) を介した  $\text{ClO}_x$  サイクルの場合、塩素原子がメタンとの反応によって塩化水素 ( $\text{HCl}$ ) に変換される反応（反応 (14)）や一酸化塩素が二酸化窒素との反応によって硝酸塩素 ( $\text{ClONO}_2$ ) に変換される反応（反応 (15)）が連鎖を停止する反応に相当する。



塩化水素や硝酸塩素は反応性が比較的低く、オゾン分解反応には直接は関与しない。しかし、塩化水素や硝酸塩素からは、次の化学反応によって塩素原子や一酸化塩素が再生される。



このことから、塩化水素や硝酸塩素は塩素酸化物を不活性な形で一時的に貯留する役割を担っていることになる。

## オゾン層破壊物質

成層圏でのオゾン分解に関与する活性種を構成する水素、窒素、塩素、臭素は対流圏から成層圏に輸送されてくる物質（ソースガスと呼ばれている）によって供給される<sup>\*</sup>。ソースガスとしては、水蒸気やメタン（水素源）、一酸化二窒素（窒素源）<sup>\*\*</sup>、塩化メチル（塩素源）、臭化

<sup>\*\*\*</sup>  $\text{HO}_x$  サイクルの場合、 $\text{OH}$  だけでなく、例外的に  $\text{HO}_2$  もオゾンと直接反応するため、 $\text{OH} + \text{O}_3 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{O}_2$  と  $\text{HO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{OH} + 2 \text{O}_2$  によって構成されるオゾン分解反応サイクル（正味の化学変化は、 $2 \text{O}_3 \rightarrow 3 \text{O}_2$ ）が存在する。この反応群も「 $\text{HO}_x$  サイクル」と呼ばれている。

<sup>\*</sup> 活性種の供給源としては、対流圏からのソースガスの輸送以外に成層圏を巡航する航空機からの  $\text{NO}_x$  の直接放出などもある。

<sup>\*\*</sup> 一酸化二窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) については、オゾン層破壊係数 (ODP) (ODP については本文 P82 を参照) が 0.017 と見積もられている (Ravishankara ら, 2009)。なお、 $\text{N}_2\text{O}$  は現在、モントリオール議定書の対象外であり、オゾン層保護法による規制を受けていないが、京都議定書の温室効果ガスとして地球温暖化対策推進法による排出抑制の対象となっている。

メチル（臭素源）がある。これらのソースガスは生物活動や自然活動によって大気に放出されるほか、人間活動に伴っても放出されている。

ソースガスの中には自然起源を持たない物質もある。人工物質であるクロロフルオロカーボン（CFC）、ハイドロクロロフルオロカーボン（HCFC）、ハロン、四塩化炭素及び1,1,1-トリクロロエタンがその代表的な物質であり、20世紀に最も顕著な濃度上昇を示したソースガスである。塩素や臭素を含むこれらの人工物質は、成層圏での塩素及び臭素の新たな供給源となっており、オゾン層破壊物質と呼ばれている。

### 活性種の生成、貯留、除去

成層圏に輸送されたオゾン層破壊物質をはじめとするソースガスは、光化学的な反応によってオゾン分解に関与する活性種を生成する。先に述べたとおり、生成した活性種はオゾン分解反応に関与しながら反応性のやや低い物質に変換される。例えば塩素酸化物の場合、CFCなどの有機塩素化合物の光化学的な反応によって生成した塩素原子は最終的に反応性が低い塩化水素や硝酸塩素などに変換される。一方、塩化水素や硝酸塩素からは光化学的<sup>\*\*\*</sup>に塩素原子や一酸化塩素が再生される（反応（16）及び（17））。そのため、塩化水素や硝酸塩素のような反応性のやや低い物質は活性種の貯留成分（リザーバー）と呼ばれている。

オゾン層を破壊する反応サイクルに直接関わってくるのは塩素酸化物のような活性種であり、オゾンの分解率は活性種の濃度の変化に影響される。一方、塩化水素や硝酸塩素のような貯留成分はオゾン分解サイクルとは直接的には関わっていないが、活性種の生成に関与している。特に下部成層圏では、オゾン分解に関与する活性種を構成する原子（塩素酸化物の場合は塩素原子）の大部分は反応性の低い貯留成分として存在し、その一部が貯留成分から活性種に変換され、活性種として存在している。さらに貯留成分から活性種を生成する効率や活性種が貯留成分に変換される効率は貯留成分によって異なっている。したがって、オゾンの破壊効率を正確に評価するには、貯留成分間の分配や貯留成分と活性種との間の分配を知る必要がある。

貯留成分はガス状の水（水蒸気）との間ではほとんど反応しないものの、氷や液滴の水とはなじみやすい特徴を有している。貯留成分と微粒子状の水との関係は、貯留成分から活性種の生成や大気中からの活性種の除去とも関連しており、オゾン層破壊の規模や長期的な変化を理解する上で重要である。

対流圏から成層圏に物質が輸送されるのと同様に、成層圏から対流圏にも物質が輸送される。成層圏に輸送されたソースガスから生成した塩素、臭素、窒素、水素の原子は、貯留成分として、成層圏内を輸送され、最終的には対流圏に戻ってくる。先にも述べたとおり、貯留成分は氷や液滴の水となじみやすいため、雨に溶けて最終的には大気から除去される。

### オゾンホールと極域のオゾン層破壊プロセス

南極域の成層圏オゾンは、北半球の同緯度と比べて冬・春には著しく少ないことが知られていた。これは、北極域に比べて南極域では、極をめぐる成層圏の西風（極夜渦又は極渦という）

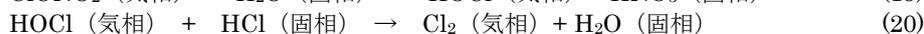
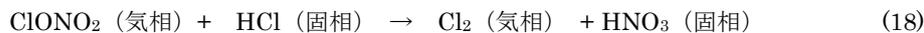
---

<sup>\*\*\*</sup> 塩化水素（HCl）から塩素原子を再生する反応(16)自体は光化学反応ではないが、塩化水素と反応するOHラジカルは、太陽紫外線によるオゾンの光分解反応を含む一連の化学反応によって生成される。このため、塩化水素からの塩素原子の生成も光化学的な反応として扱っている。

が円状に安定して流れているため、極域の空気は低緯度側のオゾンの濃い空気と混ざりにくいからだと説明されてきた。1980年代に入って、春季特に10月期にはオゾン量が異常に少ないこと、さらにその量が年々減少を続けていること、また、この低オゾン量の領域が南極大陸全域にかぶさるように広がっていることが明らかとなって、この現象をオゾンホールと呼ぶようになった。オゾンホールが最も発達する南半球の春季には、オゾンホール内側の下部成層圏(高度10~25km)において、オゾンがなくなったといえるほど低濃度となることが観測されている。

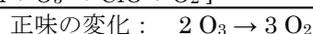
オゾンホールが形成される春季の南極域では、太陽光は弱いため十分な濃度の酸素原子が存在できず、反応(5)と(6)で示したようなオゾン分解サイクルは効率的ではない。さらに、著しい低濃度オゾンが観測される10~25kmの高度領域では、通常ならば塩素酸化物・臭素酸化物の大部分は化学的にやや不活性な貯留成分の形で存在しているため、反応(9)~(15)で示したようなオゾン破壊反応サイクルもそれほど強力に働かないはずである。このため、オゾンホール形成では何らかの特異的なオゾン分解反応が存在していると考えられた。

南極域上空の成層圏の気温は冬季(極夜)に著しく低下するため、南極域下部成層圏では極成層圏雲(PSC)と呼ばれる微粒子が生成される。極成層圏雲が存在すると、太陽光が届かない条件でもその粒子表面で不均一相反応(反応(18)~(20))が進行し、反応性が低い硝酸塩素や塩化水素が、光分解しやすい塩素分子(Cl<sub>2</sub>)や次亜塩素酸(HOCl)に変換される。



さらに、上記の不均一相反応によって生成される硝酸(HNO<sub>3</sub>)は極成層圏雲粒子上にとどまるため、気相中ではNO<sub>x</sub>濃度が低く抑えられることになり、反応(17)の連鎖停止反応の効率が抑えられ、効率よく連鎖反応が進行するための条件が整うことになる。

南極域では反応(18)~(20)で表した不均一相反応が効率よく進むため、太陽光が戻る春季に光化学反応を通して多くの塩素酸化物が生成されることになる。実際、オゾンホール内では高濃度のClOの存在が観測で確かめられている。このように、南極域成層圏ではClO濃度が異常に高いため、反応(21)~(23)を含む特異的なオゾン分解反応が存在し、著しいオゾン破壊が進行している。



なお、上記のオゾン分解反応もClO<sub>x</sub>サイクルと呼ばれている。

また、オゾンホール内では高濃度のClOが存在するため、上記のClO<sub>x</sub>サイクル以外にもClOが関与する反応によって、オゾンが効率的に分解される。特に、先に反応(11)~(13)の形で述べたClO-BrOの相互反応を含むオゾン分解サイクルは重要である。

## 南極域と北極域の相違

極成層圏雲は冬季成層圏の極低温状態でのみ存在し、高度 20 km 付近で $-78^{\circ}\text{C}$ 以下で形成される、硝酸水和物の結晶微粒子又は硫酸・硝酸・水の過飽和混合液の微粒子から成るものと、 $-85^{\circ}\text{C}$ 以下で形成される氷の結晶微粒子から成るものとの二種類がある。極夜渦が安定していて成層圏大気が極低温となる南極域冬季では、極成層圏雲が下部成層圏に常に存在し、塩素化合物は活性化され、春になって成層圏に太陽光が当たるようになると、一気にオゾン分解反応サイクルが働き出し、オゾンが減少し始める。

一方、北極域の冬季は、成層圏の極夜渦は下層大気の擾乱の影響を受けて変形・蛇行しやすく、冬の途中で分裂・衰退することもあり、一般的に不安定である。このため、極成層圏雲は冬の間長期継続して存在することは珍しく、したがって、南極域のような大規模なオゾンホールは発生しにくい。それでも、南極域と同じオゾン分解反応サイクルは北極域でも働いており、年によっては小規模のオゾンホールが現れることもある。オゾンが少なくなった北極域の空気は間歇的に低緯度側に拡がるので、北半球の中高緯度における冬・春のオゾン減少は近年顕著である。

### 参考資料3. QBOによるオゾン変動

赤道大気の準2年周期振動(QBO)は、赤道域の下部成層圏において約2年の周期で東風と西風が交代する現象である(e.g. Anstey et al., 2022)。本文1-2節で述べたとおり、オゾン全量にはQBOに伴う地球規模の変動が存在する。その変動は、主にQBOに伴う鉛直流(上下方向の大気の流れ)の変動によるものなので、本節ではQBOの鉛直構造と、QBOに伴ってオゾン量が増減するしくみを解説する。

#### 近年のQBOとそれに伴うオゾン全量偏差

図1-資-2の上のパネルには、2002年以降の赤道上空における東西風速の鉛直分布の経年変化を示す。図で、ある気圧面において横軸の時間方向に風速を見ていくと、東風と西風が約2年の周期で交代していることがわかる。また、東風も西風も上層から時間とともに下層へ降りてきており、例えば、30hPa付近の高度で東風(図1-資-2で茶色の部分)の時は、下層の70hPa付近の高度では西風になっている、といったような鉛直構造をしている。

下のパネルには、一例として(a)2010年10月(b)2010年4月のオゾン全量の1997年～2006年平均値からの偏差の分布を示す。30hPaで西風となっている(a)2010年10月では赤道付近のオゾン全量が増加しそのすぐ高緯度側(30度付近)で減少、逆に30hPaで東風となっている(b)2010年4月では赤道付近のオゾン全量が減少しそのすぐ高緯度側(30度付近)で増加している。また、2010年の4月および10月に限らず、過去に赤道上空の東西風分布が(a)または(b)と同様な状況であったときは、同様なオゾン全量の偏差が生じている<sup>2</sup>。上のパネルで太い縦実線は(a)の状況に相当する時期で、赤道付近でオゾン全量が増加しそのすぐ高緯度側で減少が見られた時期、太い縦鎖線は(b)の状況に相当する時期で、赤道付近でオゾン全量が減少しそのすぐ高緯度側で増加が見られた時期である。(b)の状況においては、下部成層圏に西風が長く留まる場合が多く、したがって、(b)に相当するオゾン全量の変化もその期間に長く見られることが多い。

---

<sup>2</sup> [https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/qbo/qbo.html](https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/qbo.html)

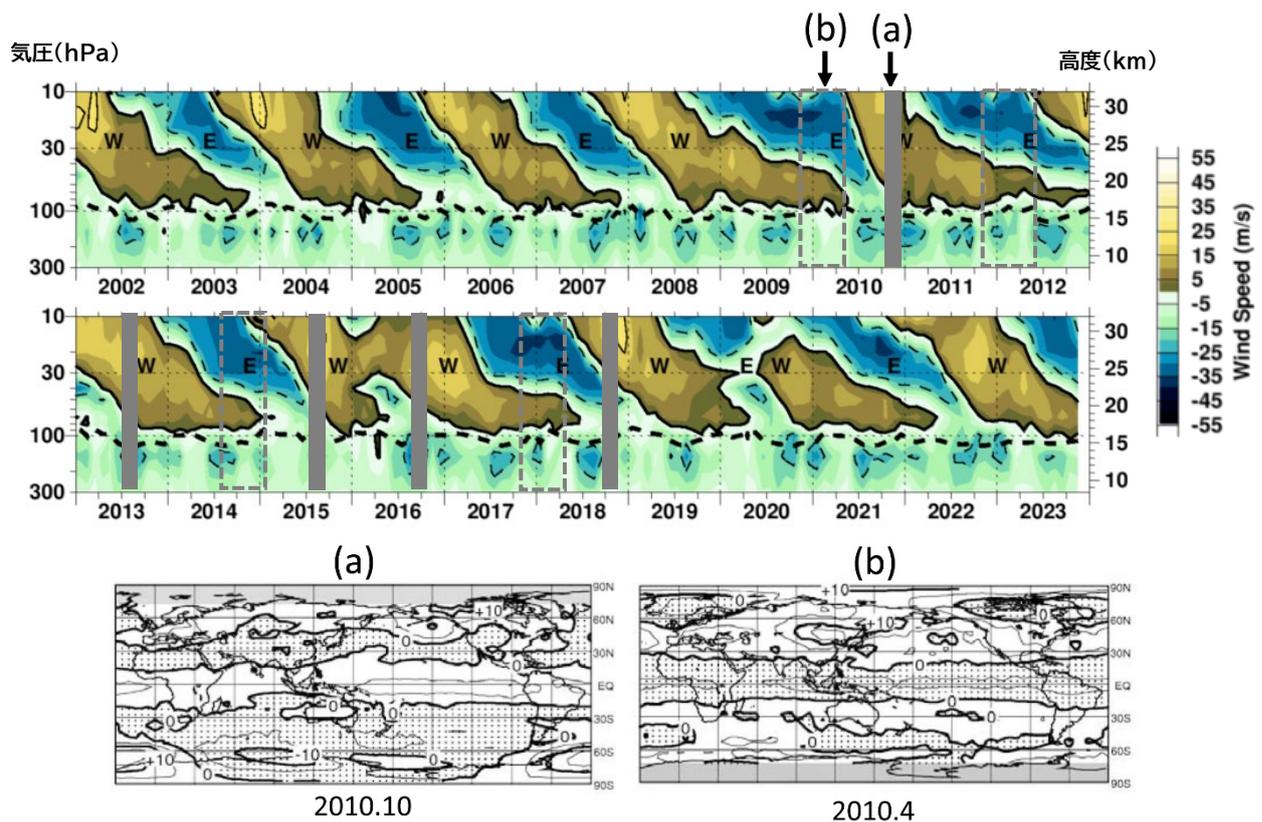


図1-資-2 QBOによる赤道東西風の変動とオゾン全量偏差

(上) シンガポール (1°N, 104°E) における月平均東西風速の時間-高度断面図。等値線は 10m/s の間隔で描かれている。正の値 (茶色部分) が西風、負の値 (緑・青部分) が東風。グレーの黒太実線は 30 hPa で西風となっているフェーズで、赤道でオゾン全量が正偏差、そのすぐ高緯度側で負偏差の構造が最もよく認められる時期を表す。縦鎖線はその逆のフェーズの時期を表す。ただし、後者のフェーズは比較的長く続く傾向があるので期間で示されている。  
(出典) NASA サイト<sup>3</sup>の図を元に作成

(下) 月平均オゾン全量偏差 (%) の地球規模の分布図。1979~2006 年の平均値からの偏差を表す。正の値 (白い部分)、負の値 (網掛け部分) を示す。(a) 2010 年 10 月、(b) 2010 年 4 月。上のパネルにそれぞれの時期が矢印で示されている。  
(出典) 気象庁オゾン層観測報告 2010 の資料 1 より作成

### QBO に伴う鉛直流とオゾン輸送

大気中のオゾン濃度は光化学反応と輸送の両方の影響を受けて変化する。QBO が起こる下部成層圏ではオゾンの光化学寿命が長く、オゾン混合比の鉛直勾配が大きい (上層に向かって急増する分布をしている) ので、QBO によって 1 年スケールの非常にゆっくりとした上昇流偏差または下降流偏差が生じた場合でさえも、それによるオゾンの輸送の変化によってオゾン濃度が変化する。図 1-資-3 に、赤道下部成層圏の上層 (たとえば 30hPa) が西風、下層が東風の場合 (a) と、その逆の上層が東風、下層が西風 (b) の場合に生じる鉛直・南北風の平均状態からの偏差 (矢印) と気温の偏差 (図中、WARM, COLD で表示されている) を示す。ここで (a) (b) は、図 1-資-2 の (a) (b) の時期に対応している。(a) の場合、西風が吹いている上層では、赤道から少し離れたところではコリオリ力によって南北両半球とも赤道向きに流れが収束し、東風が吹いている下層では、その逆に南北両半球とも流れが赤道から離れて発散する。それを補うように上層から下層へ下降流偏差が生じる。この下降流偏差によって、もともと赤道域に生じている上昇流が弱まり、オゾン濃度の低い下層からの空気の流入が弱まり、オゾン全量が増加する。また、両半球の赤道から少し離れたところ (30 度付近) では上昇流偏差

<sup>3</sup> [https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/met/qbo/qbo.html](https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/qbo/qbo.html)

が生じ、これによってオゾン全量が減少する。(b)の場合、(a)と逆のことが起こる。

日本など、亜熱帯～中緯度域におけるQBOによるオゾン全量の変化は、赤道のすぐ高緯度側(図1-資-3(a)の上昇流、(b)の下降流)の影響を間接的に受けていると考えられる。

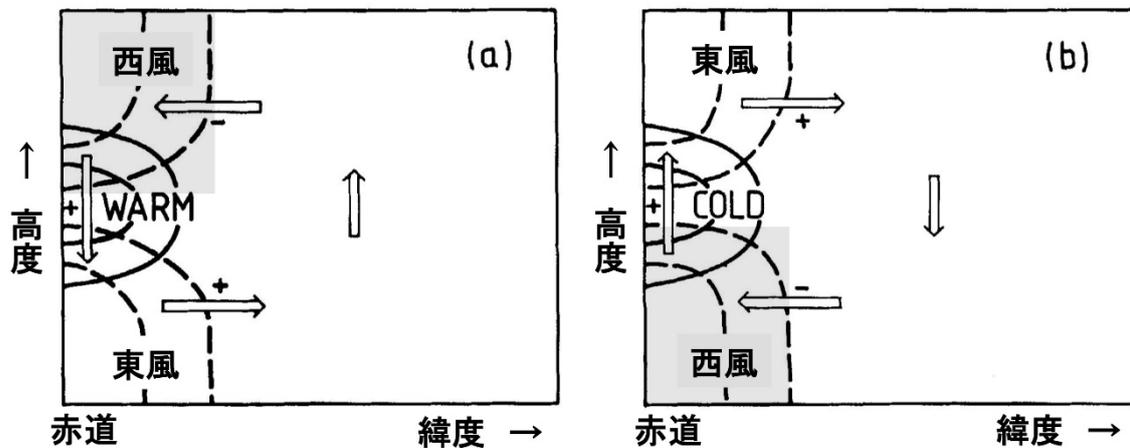


図1-資-3 QBOの東西風分布とそれに伴う大気循環の模式図

QBOによる、経度平均の東西風速(鎖線)、経度平均気温の偏差(実線)、鉛直・南北風の偏差(矢印)、西風の加速(+・減速(-)の分布。(a)上層に向かって西風が強まる場合(b)上層に向かって東風が強まる場合。(a)の状態では上層の西風が吹いている領域で西風の減速(図中の-)、下層の東風の吹いているところで西風の加速(図中の+)が起こり、1年ほどで(b)の状態へと移る。(b)では、上層の東風の吹いているところで西風加速、下層の西風の吹いているところで西風の減速が起こり、1年ほどで(a)の状態へ戻る。

(出典) Plumb and Bell (1982) Figure 1 より作成

## 参考資料4. オゾン層の日周期変動

### (その実態・メカニズムとトレンド推定への影響)

#### 概要

成層圏(高度 10-50km) オゾン層は人体に有害な紫外線を吸収すると同時に、地球気候形成に極めて重要な役割を果たしている。これまで様々な時間スケールのオゾン量変動が研究されてきたが、地球大気的基本的な周期性である日周期変動(一日の中でオゾン量がどのように変化するか)については観測例がほぼ皆無であった。

その折、SMILES (Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder: 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ)が国際宇宙ステーション日本実験棟(JEM: Japanese Experiment Module)「きぼう」の船外プラットフォームに取り付けられ、大気微量成分観測を実施した(期間: 2009年10月-2010年4月)。SMILESは(a)超高精度観測 (b)一日のうち異なる時刻を観測可能、という日周期変動観測に不可欠な二大長所を併せ持つ。

SMILES 観測データを用いた研究からオゾン日周期変動のグローバルパターンを世界で初めて高精度で検出<sup>(1)</sup>し、数値シミュレーションの結果も使用してその変動メカニズムを解明<sup>(2)</sup>した。これにより、観測・理論に裏打ちされた成層圏オゾン日変動の描像を世界で初めて得ることができた。

#### (1) オゾン日周期変動のグローバルパターンの検出

図 1-資-4 左に示すように、成層圏オゾン量は高度によって異なる日周期変動パターンを示し、その変動幅は平均値に対して最大 8%程度に達することがわかった。これはオゾン層破壊・回復に伴う長期変化(数%/10年)と同程度の大きさである。また、カラムオゾン量(ある地点の上空に存在するオゾンの総量)も 1%程度の日周期変動を示すこともわかった。なお、観測とは独立な化学輸送モデル(数値シミュレーション)でも同様の特徴が再現されている(図 1-資-4 右)。

#### (2) 変動メカニズムの解明

従来、成層圏オゾン日変動は主として光化学効果(太陽光の日周期変動による光化学変化)によって生じると予想されていたが、化学輸送モデルの解析により、これらに加えて力学効果(上昇流/下降流の日周期変動によるオゾンの鉛直輸送効果)も重要であることがわかった。

#### オゾンアセスメントレポートにおける本成果の位置付け

上記の成果は「2014年科学評価パネル(WMO, 2014)」の2.3.1節「オゾン日周期変動とそれらが長期トレンド推定に与える影響」において、オゾン量変動に関する新たな知見として取り上げられた。同時に、日周期変動の実態解明は「オゾン長期トレンド推定の精度向上の鍵」としても注目されている。すなわち、オゾンの長期トレンドを推定するにあたって用いられる衛星観測のほとんどは(SMILESとは異なり)一日の特定の時刻にのみ観測を行う。したがって、観測時刻に偏りのあるデータを扱う際には、日周期変動を考慮した補正を行う必要がある(図 1-資-5 参照)。この問題は従来から指摘されてはいたものの、日周期変動の実態が明らかでなかったため等閑にされてきた。SMILESの精密観測によってもたらされた本成果は、この

問題を解決する突破口を開くものである。成層圏におけるトレンドは「数%10年」のオーダーであり、日周期変動補正の効果は無視できない。アセスメントレポートへの掲載は、今後これらの効果を考慮したより精度の高いトレンド推定を促すものと理解される。

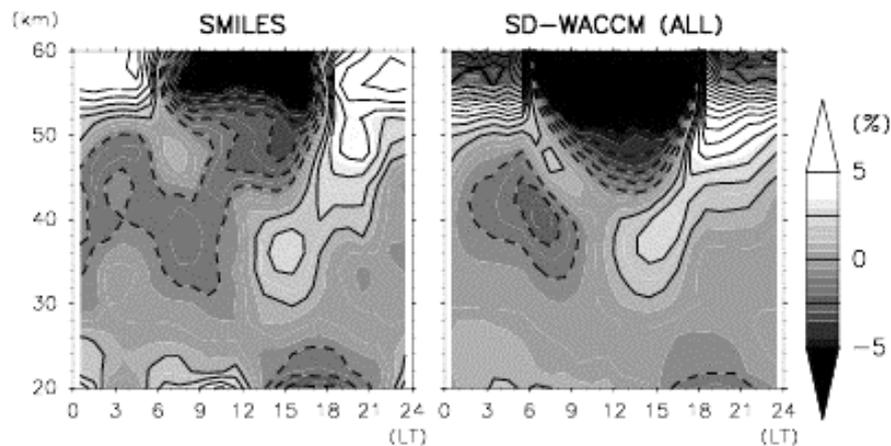


図1-資-4 熱帯(10°S-10°N)におけるオゾン量の日周期変動

単位：日平均値に対する割合(%)の時刻(横軸)－高度(縦軸)断面図。(左) SMILES 観測結果、および(右) 化学輸送モデル(WACCM)によるシミュレーション結果。Sakazaki et al. 2013に基づく。同図がWMO(2014)にも掲載された。

(出典) 京大大学生存圏研究所坂崎貴俊氏提供データ

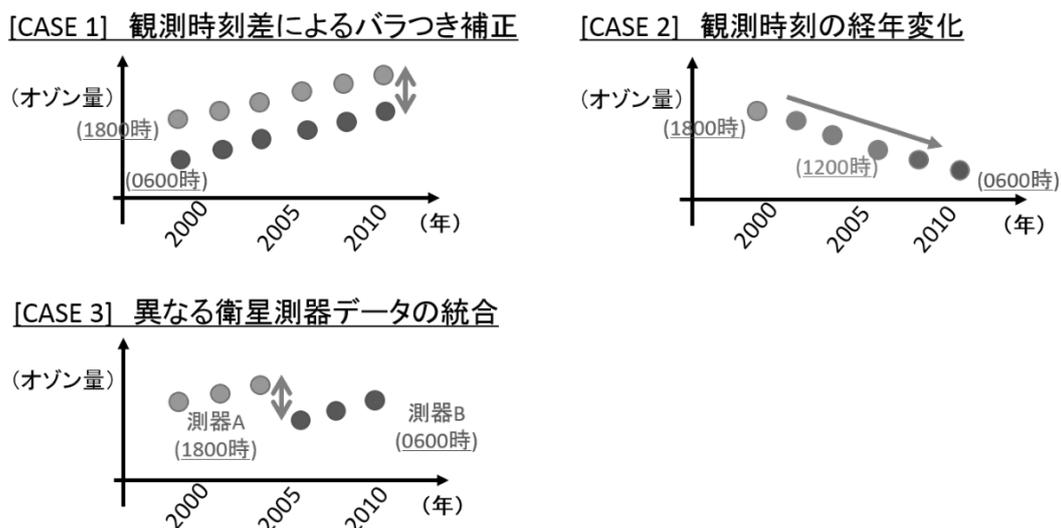


図1-資-5 オゾン量およびその長期トレンド推定に日周期変動が影響を与える例

(CASE 1) 特定の時刻にのみ観測を行う衛星データ(例：太陽掩蔽観測)を使用する際、日周期変動による観測量のバラつきを補正することが必要(Sakazaki et al., 2015)。(CASE 2) 観測する時刻が経年変化する衛星データ(例, SBUV(2))を使用する際、日周期変動による“偽の経年変化”の除去が必要。(CASE 3) 異なる衛星観測データを統合して一つの時系列を構築する際、観測時刻差によるデータ補正が必要。

(出典) 京大大学生存圏研究所坂崎貴俊氏提供データ

## 参考資料5. ブリュウワ・ドブソン循環

空気は、平均的には、熱帯において対流圏から成層圏に入って上昇し、中高緯度において下降して対流圏に戻る。この全球大気循環の存在は、Alan Brewer と Gordon Dobson による水蒸気とオゾンの観測によって、半世紀以上前に初めて推定された。これが名前の由来である。成層圏内における下降流は、オゾンの豊富な中部上部成層圏の空気を下部成層圏に輸送する主要なメカニズムであり、これが特に冬季から春季にかけてのオゾン全量の大きな南北勾配を作り出している。最近の研究により、ブリュウワ・ドブソン循環はふたつの異なる経路に分けて理解することが適切であることが分かってきた（図 1-資-6）。ひとつは shallow branch（浅い経路）と呼ばれるもので、下部成層圏内を熱帯から上昇しつつ極方向へ流れて亜熱帯から中緯度において下降するものである。もうひとつは deep branch（深い経路）と呼ばれるもので、上部成層圏から中間圏にまで至ったのちに下降し中高緯度にまで至る流れである。後者の方は成層圏滞在時間が数年から 10 年と非常に長くなる。

大気微量成分の分布を決める輸送過程としてのブリュウワ・ドブソン循環は、対流圏で生成し上方伝播してくるさまざまな大気波動の砕波により駆動される残差子午面循環、地球規模のロスビー波等による水平混合、乱流拡散の三者があわさったものであると言える。水平混合は特に中緯度で重要である。また、成層圏と中間圏の気温分布は、オゾン、二酸化炭素、水蒸気分布に影響を受けた放射伝達過程により決まる気温分布が、ブリュウワ・ドブソン循環に伴う熱力学過程（上昇域で降温、下降域で昇温）により変調を受ける形で決まっている。

地球温暖化の進行に伴い、ブリュウワ・ドブソン循環は加速することが多くの気候モデルにより予測されている。その主な原因として、温暖化により亜熱帯偏西風ジェットが強化かつ上方変位し、その結果ロスビー波の砕波による摩擦力がより高高度、より赤道側で強化されるためであると議論されている。ただし、モデル内でパラメタ化されている山岳波とそれ以外の波とのトレンドへの貢献度の違い、定常波（stationary waves）と非定常波（transient waves）との貢献度の違いなどについて、モデル間で定量的な違いがあり、今後さらなる研究が必要である。ブリュウワ・ドブソン循環の加速により、下部成層圏のオゾンは熱帯で減少し中高緯度で増加することが予想される。さらにこうしたオゾンの変化が、放射過程、気温、東西風分布の変化を通して、波と平均流の相互作用過程を変化させ、ブリュウワ・ドブソン循環に変化をもたらすと考えられる。

観測によるブリュウワ・ドブソン循環の長期変化の検出は容易ではない。その理由は、長期変化はあっても小さいため自然変動との区別が難しいこと、ブリュウワ・ドブソン循環の直接測定は不可能で間接的にしか見積もることができないことである。とはいえ、近年、様々な気温観測データセット、準二年振動の振幅、オゾンや水蒸気や他の様々な化学種の観測データ、二酸化炭素や六フッ化硫黄の観測データに基づいた大気年代（age of air、熱帯対流圏界面を通過してからその地点に至るまでの時間）の推定値、様々な再解析データなどを用いて、ブリュウワ・ドブソン循環の長期変化が見積もられてきている。その結果、shallow branch のうちの熱帯の上昇流については複数、異種の観測データから加速傾向にあることが分かっており、これ

[<<最初のページへ戻る](#)

は気候モデルの結果とも整合的である。いっぽう、**deep branch**、中部上部成層圏については観測データにより結果はまちまちであり、不確かさが大きい。

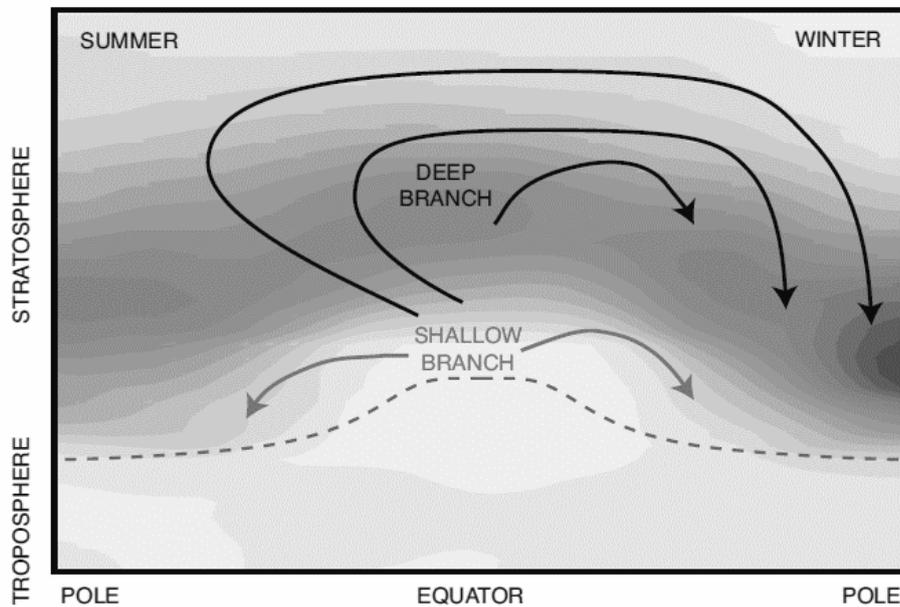


図1-3-6 プリューワ・ドブソン循環のふたつの経路、浅い経路（shallow branch）と深い経路（deep branch）の模式図。

横軸は緯度、縦軸は高度。夏至・冬至の時期の様子。陰影で、北半球冬季の東西平均したオゾン濃度（分圧）を示す（濃い色ほど濃度が高い）。また、点線で、対流圏界面の位置を示す。

（出典）Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014 (WMO, 2014)

## 参考資料 6. オゾン層観測手法の種類

### ブリュワー分光光度計、ドブソン分光光度計等

(全量観測)

ブリュワー分光光度計やドブソン分光光度計によって、オゾン全量を測定することができる。ブリュワー分光光度計は、直達又は天空から散乱された太陽紫外線を回折格子によって分光し、オゾンに強く吸収される波長の光と比較的吸収が少ない波長の光の強度比を測定することにより、地上から大気上端までの気柱に含まれるオゾンの総量（オゾン全量）を求める。ドブソン分光光度計は、プリズムを用いて分光を行い、同様の測定を行う。

これらのほかの測定器として、2つのバンドパス・フィルターにより分光するフィルター式分光光度計があり、旧ソ連圏で使用されている。

(反転観測)

ブリュワー分光光度計又はドブソン分光光度計を用いてオゾンの高度分布を求める手法で、天頂方向から入射する光の強度比を2種類の波長で測定する。この場合、大気に入射した太陽光のうち、空気分子で散乱され真下に向かったものが測定される。どの高度で散乱された光が卓越するかは、太陽天頂角と波長に依存する。これらの関係は、太陽天頂角が大きいほど高度依存性が強くなるので、いくつかの異なる太陽天頂角での測定から、オゾンの高度層ごとの濃度が算出される。

### オゾンゾンデ

オゾンゾンデはゴム気球に測定器を取り付けて飛揚させ、各高度で測定したデータを無線で地上に送信するもので、地上から高度 35km 位までの間のオゾン濃度を測定することができる。定常的に使われているオゾンゾンデの測定原理は、電気化学法と呼ばれるものである。ヨウ化カリウム (KI) 溶液にオゾンを含む空気を通し、ヨウ化カリウムとオゾンの反応で生じるヨウ素分子が陰極電子と作用してできる陰イオンによる電流を測定する。この場合、反応したオゾンの数密度に比例した電流が得られるので、空気中のオゾン濃度がわかる。

### オゾンライダー

ライダー（レーザーライダー）はパルスレーザー光を大気に発射し、空気分子、エアロゾル、雲などによる反射光（後方散乱光）を検出する手法で、レーザー光の発射と受信の時間差から散乱物質までの距離が求まる。ブリュワー分光光度計やドブソン分光光度計が太陽紫外線を光源としてオゾンによる吸光を測定するのに対し、オゾンライダーでは自らがオゾンの光吸収帯が存在する波長域の紫外レーザー光を発して、オゾンによるその吸収の大きさを測定することで、地表面から散乱地点までの高度範囲に存在するオゾン密度を求める。異なる高度からの散乱光における光吸収の大きさを比較することで、オゾンの高度分布を求めることができる。

具体的には、オゾンによる吸収の大きな波長と比較的吸収の小さな波長のレーザーパルス光を大気中に発射する。レーザー光は空気分子などで散乱されるので、後方に散乱される光を光学望遠鏡（受光望遠鏡）で受信し、パルスを発してから時間遅れの関数として記録する。時間の遅れからは距離（高度）の情報が得られ、2つの波長の信号強度の違いにより地上からそ

[<<最初のページへ戻る](#)

の高度までのオゾンによる光の減衰（積分された吸収量）がわかる。したがって、一定の演算処理によってオゾン密度の高度分布が計算される。

これまで、米、仏、日本等で開発されてきたオゾンライダーによれば、高度 40~50km の上部成層圏までの測定を、2~4 時間の測定時間をかけることにより高度分解能 1~4km で行える。

### ミリ波センサー

オゾンからの熱放射をミリ波帯で測定するもので、オゾン分子の回転状態遷移によって生じるスペクトル線の輪郭からオゾンの高度分布に関する情報が得られる。大気の高い高度から発せられるスペクトル線の輪郭は、幅の狭いスペクトルとなるが、高度が下がると空気分子との衝突のためスペクトル幅が広がる。測定されるスペクトルは、これらの重ね合わせである。気温・気圧の高度分布がわかっているならば、各高度に対するスペクトルの形状は計算されるので、オゾンの高度分布を算出することができる。

ミリ波センサーは、昼夜を問わず観測できるという利点がある。高度 70~80km までの高度分布を分解能 10km 程度、5~20 分程度で測定できる。

### 人工衛星センサー

すべての気体成分は、それぞれ固有の放射・吸収スペクトルを有していることから、適切な波長を選んで、大気の放射・吸収の測定を行うことで、成分別の濃度を遠隔的に測定することができる。衛星に搭載されるオゾン観測センサーとしては、オゾンの発する赤外放射やミリ波放射を測定する方式（放射測定法）と、オゾンによる太陽光の吸収を測定する方式（吸光測定法）とに大別できる。後者にはさらに、太陽光を直接の光源として地球周縁大気を通過する際の吸収を測定する方法（太陽掩蔽法）と、地球大気による太陽光の散乱光を測定する方法（後方散乱法）とがある。

放射測定法に基づくセンサーにも、地球周縁方向を測定対象とする方法と、衛星直下を測定方向とする方法がある。前者の代表例としては、LIMS、CLAES、MLSに加え、日本の測器としてSMILES、また後者には、同じく日本の測器IMGがある。

太陽掩蔽法では、太陽とセンサーの位置関係によって主たる吸収を受ける高度が異なることを利用して、高度分布の測定を高精度に行うことができる。太陽掩蔽法の代表例としては、SAGE、SAGE II、HALOEに加え、日本の測器としてILAS、ILAS-IIが挙げられる。後方散乱法の場合には、空気分子で後方散乱された太陽紫外線強度をいくつかの波長で測定する。波長によって大気層への紫外線の侵入高度が異なることを利用して、オゾン高度分布又は全量を求める。後方散乱法としては、TOMS、SBUV/2、GOME等が代表的である。

## 参考資料7. オゾン層の観測ネットワーク

### 全球大気監視計画(GAW 計画)

国際オゾン委員会 (IOC) は、1957～1958年の国際地球観測年 (IGY) に際して各国の気象機関にオゾン観測の実施を呼びかけ、これにより全地球規模でオゾン観測が行われるようになった。オゾン層破壊が懸念されるようになって、オゾン層のモニタリングの重要性が再認識され、WMO は、1981年にこれまでの観測網を全球オゾン観測システム (GO<sub>3</sub>OS: Global Ozone Observing System) として整備した。

また、オゾン層破壊、地球温暖化等の地球環境問題の顕在化に伴い、オゾン、温室効果ガスなどの大気微量成分を地球規模で観測し、データの収集、管理、提供を行う体制の実現が必要になったことから、WMO は 1989年に既存の観測網である GO<sub>3</sub>OS 及び大気バックグラウンド汚染監視網 (BAPMoN: Background Air Pollution Monitoring Network) を基礎とした全球大気監視 (GAW) 計画を発足させた。

### 大気組成変化検出のためのネットワーク(NDACC)

成層圏及び対流圏大気組成変化の検出、衛星観測データの検証、オゾン層や大気組成変動のメカニズムの理解を目的として、ライダー、ミリ波放射計、フーリエ変換赤外分光計、可視・紫外分光計等の地上ベースの遠隔測定によるモニタリングステーションを北極域、北半球中緯度、熱帯、南半球中緯度及び南極大陸に配備するプロジェクトが国際的に進められている。

我が国は、運営委員会に参加している他、ニュージーランドのローダーにおける気象庁気象研究所によるエアロゾルライダー、北海道陸別町における名古屋大学・国立環境研究所によるミリ波オゾン放射計、赤外分光計観測等を行っている。

## 参考資料8. オゾンデータの管理・公表

### 気象庁によるデータ収集・管理・公表

我が国が収集したつくば、南極昭和基地におけるオゾン観測データは、気象庁大気海洋部環境・海洋気象課に集められ、データチェックを経た後、毎月下旬に気象庁ホームページの「オゾン層・紫外線」([https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/diag\\_o3uv.html](https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/diag_o3uv.html))の中で各地のオゾン全量の経過等について公表される。これらの観測による成果については、毎年年次報告として公表しており、「オゾン層・紫外線の年のまとめ」「大気・海洋環境観測年報」が気象庁ホームページで公表されている。

### WOUDC によるデータ収集・管理・公表

日本を含め世界各地から収集したオゾンデータは、カナダにある WMO の世界オゾン・紫外線資料センター(WOUDC)に送付され、品質管理が行われる。また、反転観測値については、すべての観測点のデータを同一方式で処理して高度ごとのオゾン量を算出している。

これらの結果は、WOUDC に保存されるとともに、「世界のオゾンデータ (Ozone Data for the World)」としてインターネットで公表され、世界各国に還元されている。

このほか、NASA やドイツ航空宇宙センター (DLR) が、TOMS データや GOME-2 データ等の衛星による観測データをインターネット上で公開している。

## 参考資料9. 解析に用いた衛星観測オゾンデータ \*

衛星による観測データとしては、Nimbus（ニンバス）7、Meteor（メテオール）3、Earth Probe（アースプローブ）の3機の衛星のオゾン全量マッピング分光計（TOMS；Total Ozone Mapping Spectrometer）のデータと、Aura（オーラ）衛星のオゾン監視装置（OMI；Ozone Monitoring Instrument）のデータと、Suomi（スオミ）NPP衛星のオゾン全量と鉛直プロファイル観測装置（OMPS；Ozone Mapping and Profiler Suite）のデータを主に使用した。Nimbus 7とMeteor 3両衛星のデータについては、Earth Probe衛星に用いられている処理方法（ver. 8）で計算されたものを利用した。また、Earth Probe衛星のTOMSデータは2007年8月に公開された修正版を利用した。Aura衛星のOMIデータについてはver. 8.5のデータに地上観測との差異がみられたため（図1-資-7）、2005年1月から2007年11月分まではver. 8を用いた。2007年12月以降はver. 8.5のデータのみしか入手できないためver. 8.5を使用している。ただし、Meteor 3衛星以後Earth Probe衛星による観測が始まるまでの一部の期間、およびオゾンの長期変化に関連した解析の一部については、NOAA（ノア）衛星搭載のタイロス実用型鉛直サウンダ（TOVS；TIROS Operational Vertical Sounder）の高分解能赤外放射計による世界のオゾン全量データおよび太陽光後方散乱紫外線計（SBUV/2；Solar Backscatter UltraViolet）による世界のオゾン全量データを使用した。各データとその使用期間は表1-資-1のとおり。なお、本文中の図のキャプションでは、TOMS、OMIおよびOMPSによるオゾン全量データを用いたことが明らかな場合は、衛星・装置名は記載せず単に「NASA提供のデータをもとに気象庁で作成」とした。

なお、解析データとしては利用していないが、OMI ver. 8.5のオゾン全量のバイアス補正を行うために、NASAが作成したSBUV(ver. 8.6) Merged Ozone Data Setsを利用した(NASA, 2012)。

表1-資-1 解析に用いた衛星データ

米国航空宇宙局（NASA；National Aeronautics and Space Administration）  
米国海洋大気庁（NOAA；National Oceanic and Atmospheric Administration）

衛星名	Nimbus7	Meteor3	Earth Probe	Aura	Suomi-NPP	NOAA	NOAA
国/機関	米国/NASA	旧・ソ連	米国/NASA	米国/NASA	米国/NASA・NOAA	米国/NOAA	米国/NOAA
観測装置名	TOMS	TOMS	TOMS	OMI	OMPS	TOVS	SBUV/2
期間	1978.11－1993.4	1993.5－1994.11	1996.7－2004.12	2005.1－2019.12※	2016.1－	1995	1995

※Aura衛星のデータはオゾンの長期変化の解析では2005.1-2015.12を使用している。

（出典）気象庁HP（[https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/3-15ozone\\_observe.html#sat](https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/3-15ozone_observe.html#sat)）

\* 気象庁ホームページ「オゾン層・紫外線の年のまとめ」参考資料より引用、一部改変

## 衛星によるオゾン全量観測データの地上観測との比較

衛星データの長期的な安定性をみるため、TOMS、OMIおよびOMPSによる観測値と、北緯30度から北緯60度の領域にある地上の観測地点における観測値との月平均値による比較結果を図1-資-7に示す。これによれば、1979～1993年のNimbus 7衛星のTOMSデータは、地上観測値に比べて約1%高い傾向である。1993年5月以降のMeteor 3およびEarth Probe衛星のTOMSデータは、ばらつきが大きく、概ね地上観測値に比べて低い。一方、2005年以降、TOMSの後継としてOMIのデータを利用しているが、バージョン変更後のデータであるOMI ver. 8.5のデータは、ばらつきは少ないものの、-2～-1%程度の地上観測値との偏差がある。OMPSのデータは地上観測値に比べて約1%低い傾向があり、他の緯度帯においても偏差がみられる(後述)。

OMI ver. 8.5とver. 8のデータの存在する期間(2005年1月～2007年11月)で、帯状平均した緯度ごとのデータについて比較すると、両者のオゾン全量の差は、緯度別・月別に分類すると各年で大きさがほぼ一致する傾向がある(気象庁「オゾン層観測報告：2008」付録1-2図A1-5参照)。この期間のデータから緯度別・月別に両者間のバイアス補正値を算出した。しかし、OMI ver. 8.5のデータと北半球中緯度の地上観測との差の傾向が、2007年12月以後はそれ以前より差が小さくなっており、傾向が異なっている。このため、NASAが作成したSBUV (ver. 8.6) Merged Ozone Data Sets (以下、マージデータとする)の帯状平均値を用いてバイアス補正値の調整を行った。具体的には、2005年1月～2007年11月のマージデータとOMI ver. 8の差の平均と、2007年12月～2011年のマージデータとOMI ver. 8.5 (バイアス補正済)の差の平均が同一となるように、2007年12月以降のOMI ver. 8.5 (バイアス補正済)データを緯度毎にさらに補正した。本報告では、緯度帯別の長期的な変化傾向を解析する際には、2007年12月以降のver. 8.5のデータ(バイアス補正済)にマージデータで調整したバイアス補正を適用した。

OMPSとOMI ver. 8.5のデータの存在する2016年1月～2020年12月で、帯状平均した緯度毎のデータについて比較すると、こちらも両者のオゾン全量の差は、緯度別・月別に分類すると各年で大きさがほぼ一致する傾向がある(図1-資-8)。この期間のデータから緯度別・月別に両者間のバイアス補正値を算出し、さらにOMI ver. 8.5の前述の2種類のバイアス補正を適用することでOMPSデータの補正値を求めた。OMPSデータについても、本報告で緯度帯別の長期的な変化傾向を解析する際には、この補正を適用した。

なお、1993年5月～1994年11月の衛星データ(Meteor 3衛星によるオゾン全量)は、オゾン全量の地上観測値からの差のばらつきが大きいため、長期変化傾向の計算から除外している。

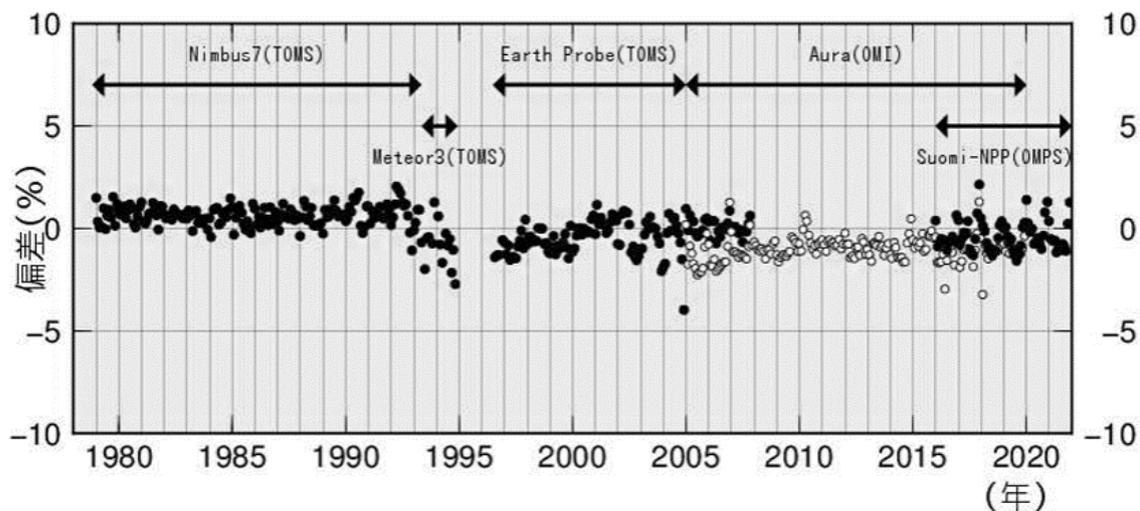


図1-資-7 衛星データと地上観測データの比較

北半球中緯度帯（北緯30度－60度）のTOMS、OMIおよびOMPSによる観測値（月平均値）と地上観測値との偏差（％）の推移。地上の観測地点に対応する衛星データを求め比較した。オーラ衛星期間前半の●はOMI ver. 8、○はOMI ver. 8.5のデータ。各月の比較地点数は20～60地点。

（出典）気象庁ホームページ（<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/coment.html>）

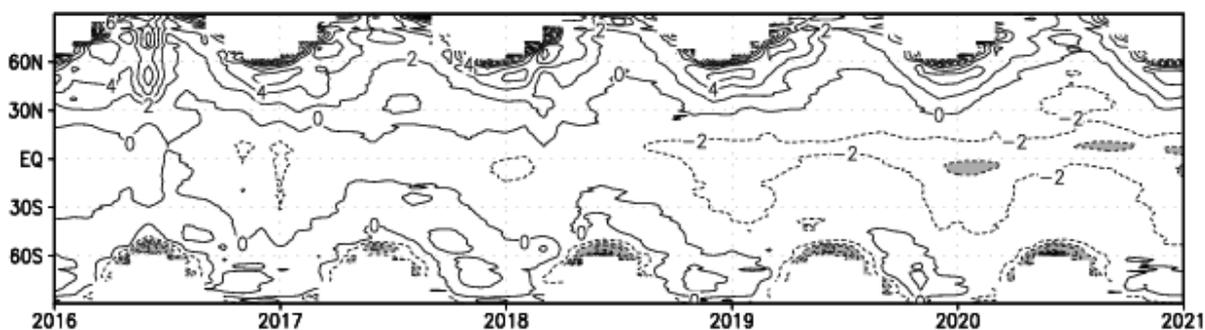


図1-資-8 OMPSとOMIver8.5のオゾン全量の差の緯度別分布時系列

OMPSからOMIver8.5を引いた値（2016年1月－2020年12月）。等値線の間隔は2 m atm-cm。  
-4 m atm-cm以下に陰影。極域冬季の空白部は太陽高度角の関係で観測できない領域。

（出典）気象庁ホームページ（<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/coment.html>）

**参考資料 10. 2024 年の月平均オゾン全量と偏差 (%) の地球規模の分布**

月平均オゾン全量・偏差 (%) の地球規模の分布図を以下に示す (図 1-資-9)。月平均オゾン全量 (左図) の等値線間隔は 15 m atm-cm、偏差 (%) (右図) については 5% である。極域における白色部分は太陽高度角の関係で観測できない領域を示す。NASA 提供の衛星データをもとに気象庁が作成した。

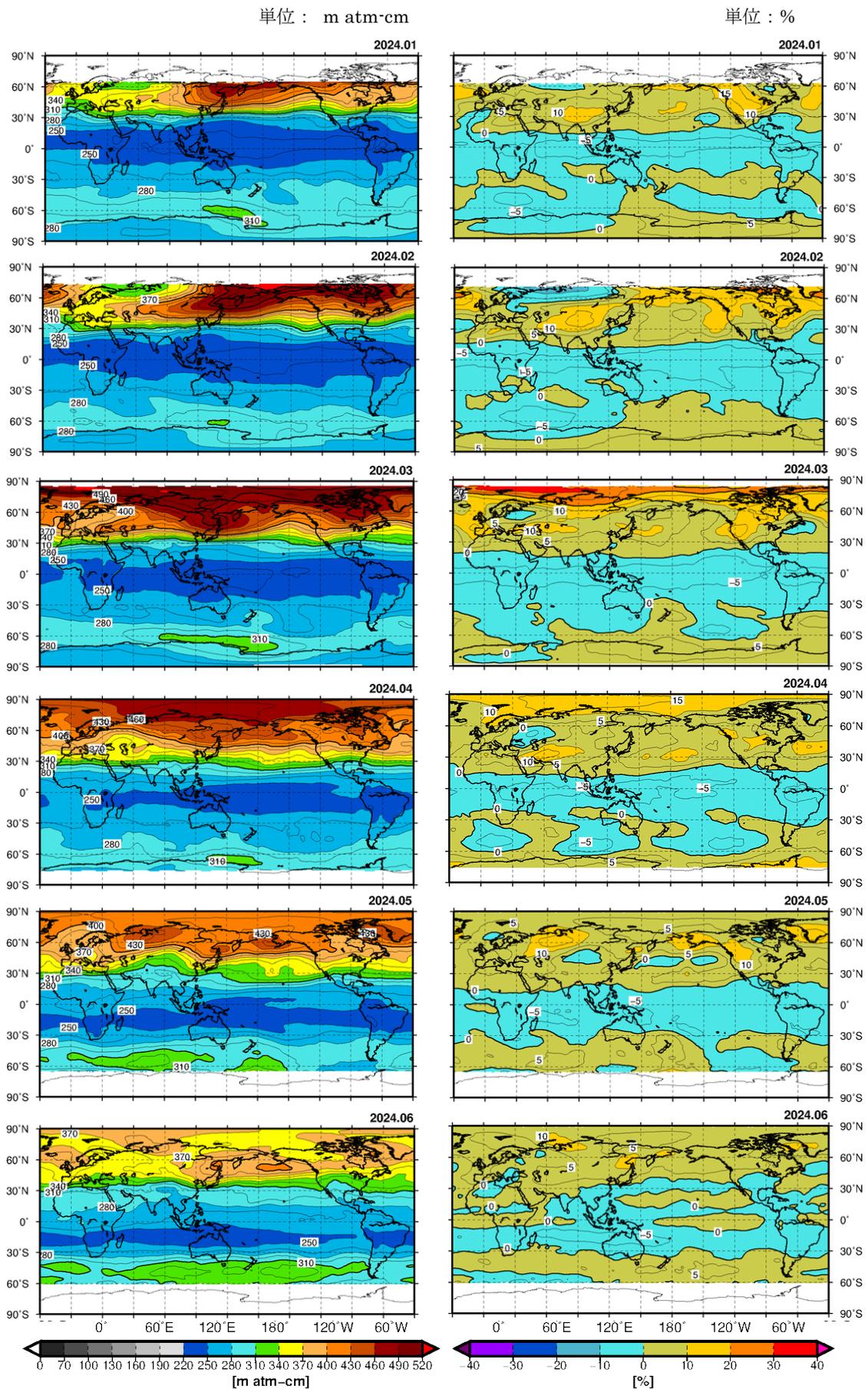


図1-資-9(1) 月平均オゾン全量・偏差 (%) の地球規模の分布図 (2024年1~6月)

(出典) 気象庁ホームページ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/coment.html>

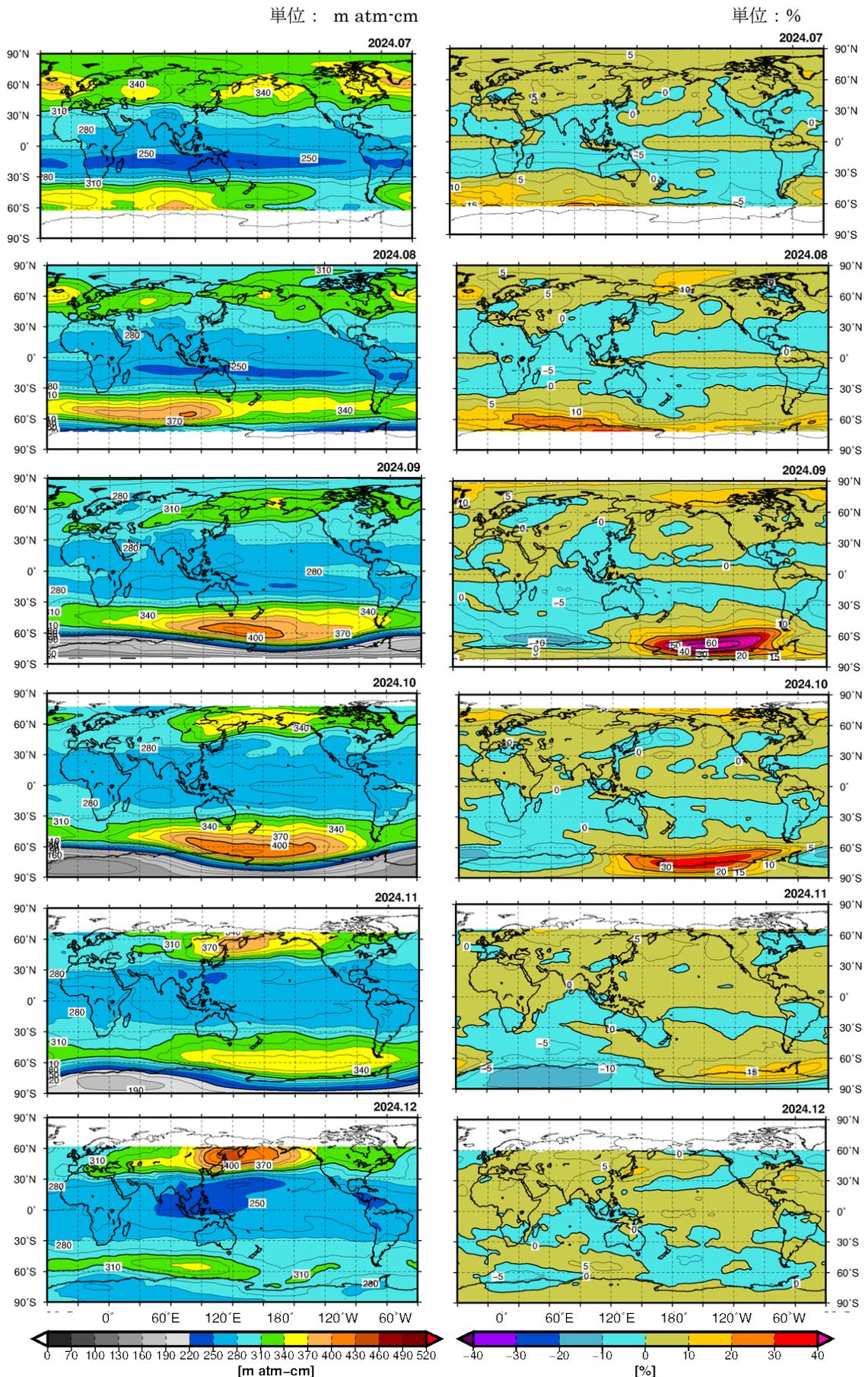


図 1-資-9 (2) 月平均オゾン全量・偏差 (%) の地球規模の分布図 (2024 年 7~12 月)

(出典) 気象庁ホームページ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/coment.html>

### 参考資料 11. 1979～2024 年の南半球の月平均オゾン全量分布 (10 月)

220m atm-cm 以下のオゾンホール領域を点域で示しており、オゾンホールの経年変化がわかる。NASA 及び NOAA 提供の衛星データをもとに気象庁が作成した。図中の●印は南極昭和基地を表す。

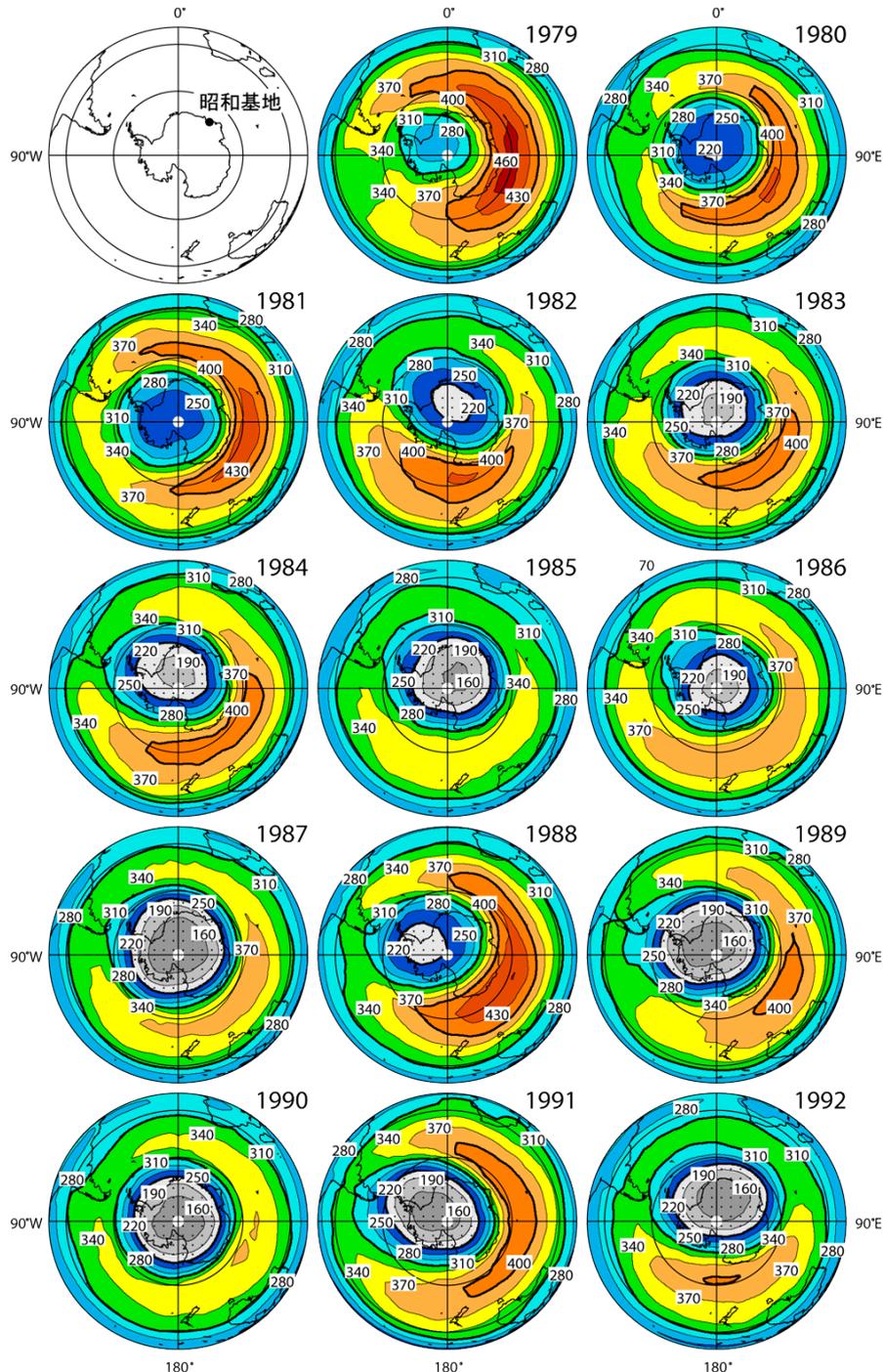


図 1-資-10 (1) 10 月の南半球月平均オゾン全量分布図 (1979～1992 年)

(出典) 気象庁ホームページ ([https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/diag\\_o3uv.html](https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/diag_o3uv.html))

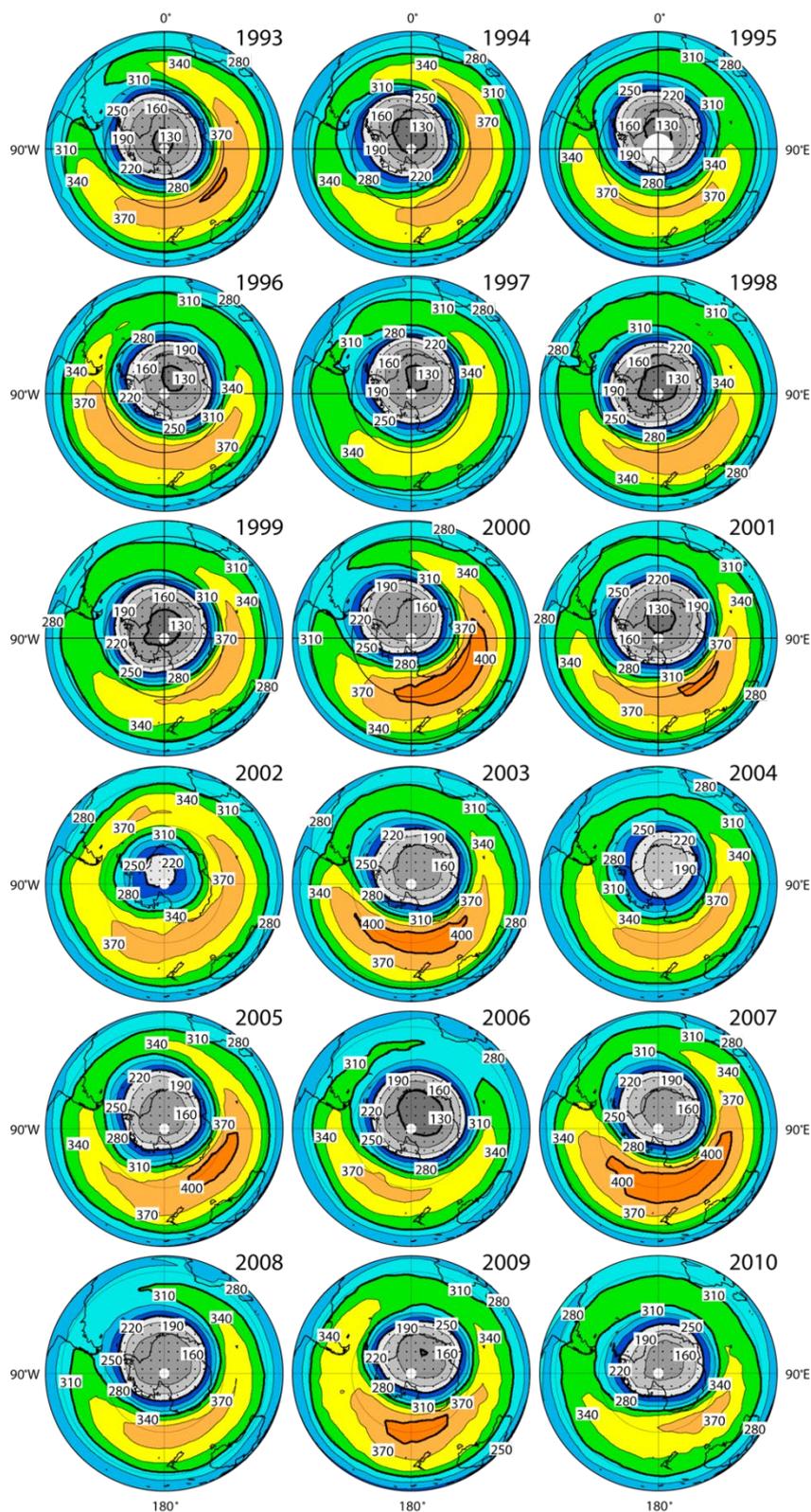


図1-資-10(2) 10月の南半球月平均オゾン全量分布図(1993~2010年)

(出典) 気象庁ホームページ ([https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/diag\\_o3uv.html](https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/diag_o3uv.html))

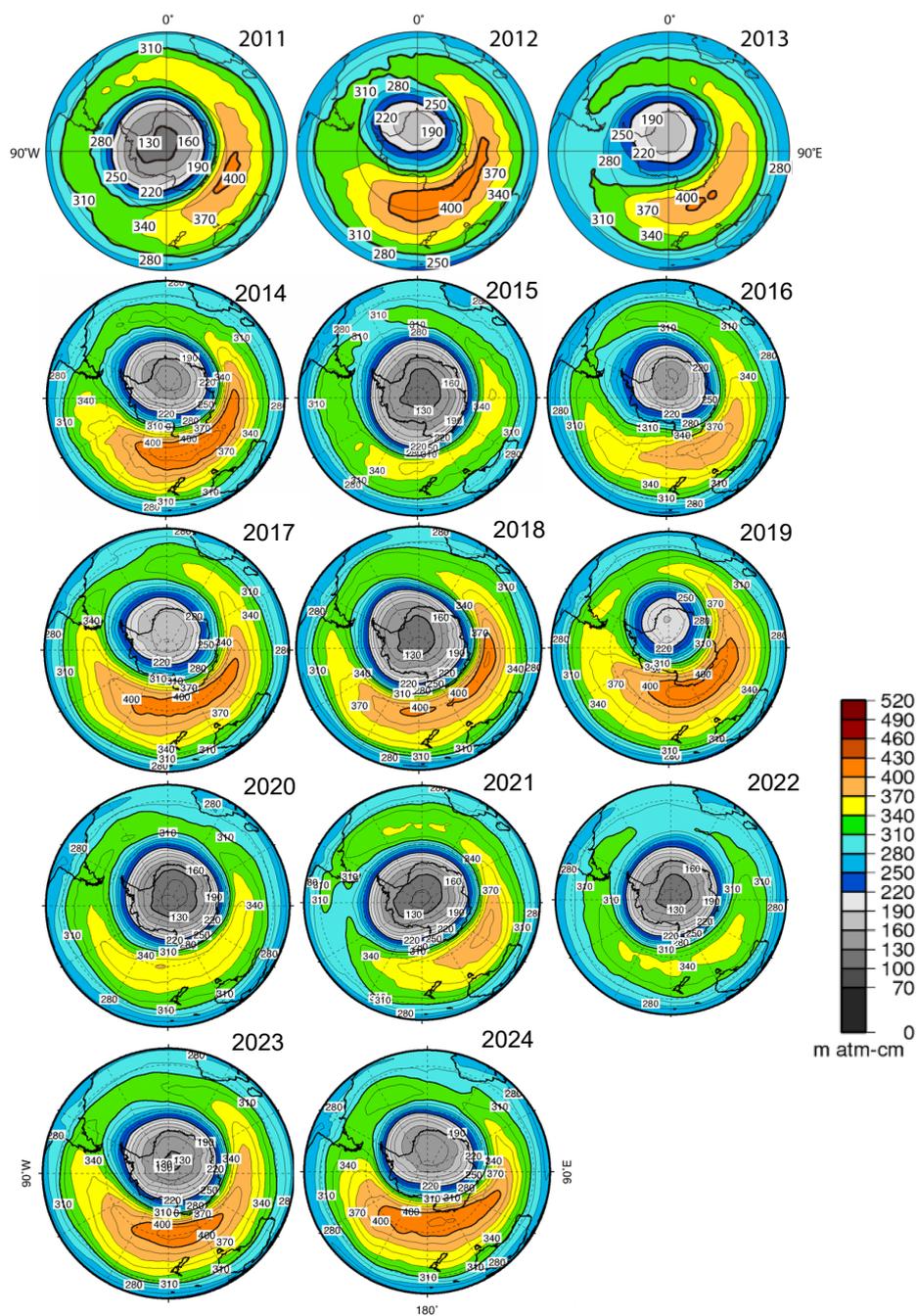


図 1-資-10 (3) 10月の南半球月平均オゾン全量分布図 (2011~2024年)

(出典) 気象庁ホームページ ([https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/diag\\_o3uv.html](https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/diag_o3uv.html))

## 参考資料 12. 地上観測による南極域でのオゾン全量推移

南極昭和基地（日本）（●印）、ハレー（英国）（△印）、ベルナドスキ（ウクライナ）/ファラディ（英国）（×印）、ロゼラ（英国）（□印）における2019年と2020年、2024年の8～12月のオゾン全量観測値を図1-資-11に示す。また、図中にはオゾンホールを目安とする220 m atm-cmを破線で示した。

2019年は8月末に成層圏突然昇温が発生し、オゾンホール形成で重要となる極成層圏雲が形成される領域が限定的となり、オゾンホール特有の化学反応によるオゾン層破壊の進行が抑制されたことに加え、極渦が弱く、また不安定であったため、11月10日のオゾンホールの消滅までの期間でも、ハレーを除く南極昭和基地も含めた3つの地上観測地点ではオゾン全量は変動が激しく、オゾン全量は全般に高めであった。

一方、2020年は極渦が安定な円形を維持し、その規模も大きい状態が長期間継続したため、4つの地上観測地点はオゾンホール内に位置することが多かった。特に、南極昭和基地やハレーは長期間継続してオゾンホール内に位置することが多かったため、12月中旬ごろまで継続的にオゾン全量の低い状態が続いた。ただし、南極半島に位置するベルナドスキ/ファラディとロゼラでは、9月～11月の期間において時々オゾンホール外に位置してオゾン全量が急増する様子が見られた。

2024年は2019年より極渦が安定しており、南極昭和基地は長期間継続してオゾンホール内に位置することが多く、10月まで継続的にオゾン全量の低い状態が続いた。

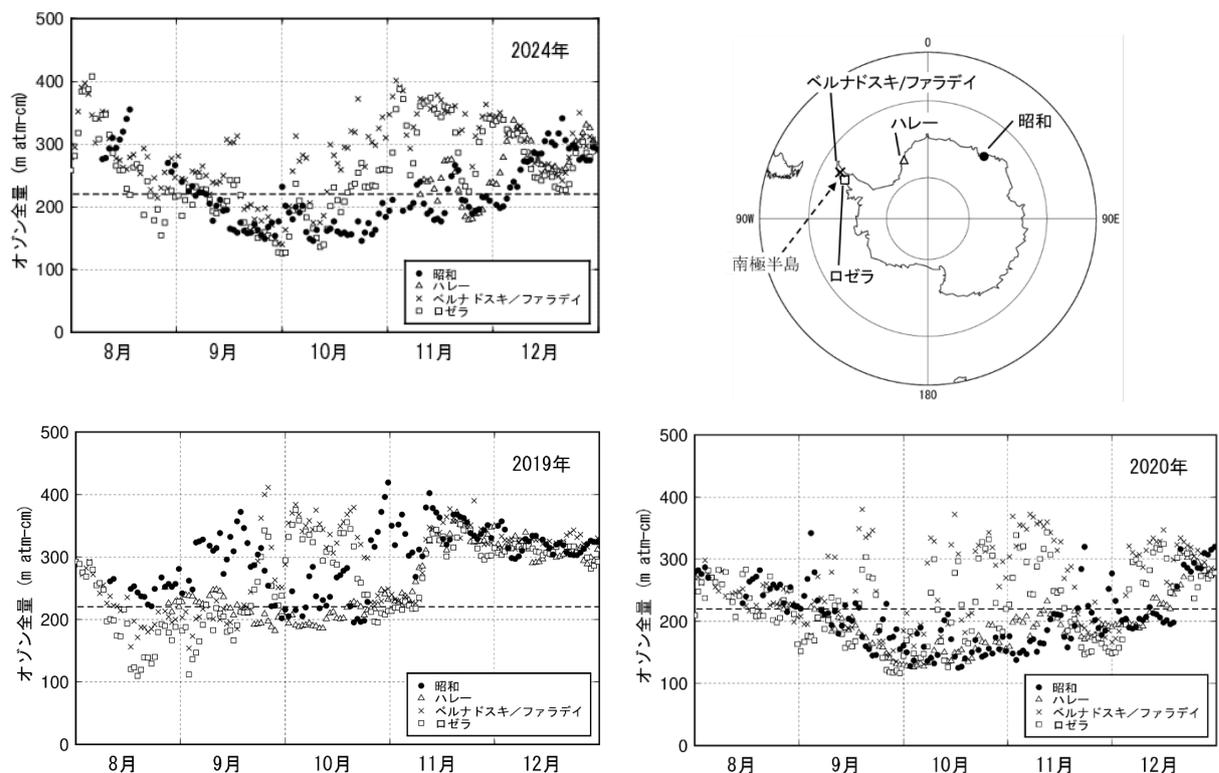


図1-資-11 南極域各国基地におけるオゾン全量の推移（2019年・2020年・2024年）

（出典）気象庁提供

### 参考資料 13. 成層圏数値モデルー化学気候モデルと化学輸送モデル

成層圏の注目する領域のオゾン量は、その領域の中での化学反応によって生成・消失するオゾン量並びに、他の領域からその領域に輸送されてくるオゾン量とその領域から他の領域に輸送されるオゾン量のバランスによって決まる。この内、化学的な生成あるいは消失の速度は、反応に関与する物質の濃度、成層圏エアロゾルが関与する場合にはエアロゾルの表面積・体積・組成、光が関与する場合は太陽光強度の波長分布に依存する。オゾン濃度・分布に影響するもう一つの要因である輸送量・輸送速度は注目している領域付近での風速分布やオゾンの濃度勾配に関連する。

オゾン濃度や分布に影響する化学反応や物質輸送の速度は、気温や圧力にも依存する。一方で、気温や圧力は、化学反応や大気の運動によってもコントロールされている。この様に成層圏での力学と化学は放射による加熱・冷却と密接に結びついている。そこで、オゾン層破壊を扱う成層圏モデルは、一般に次の概念図で示す様な構成・考え方に基づいて作られる。

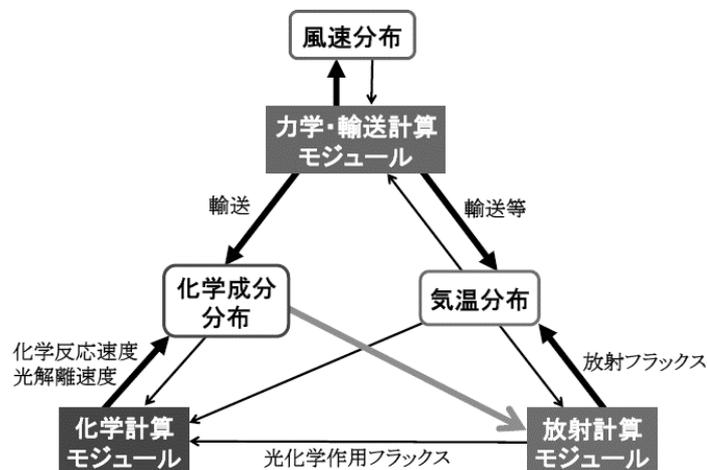


図 1-資-12 (成層圏) モデルの概念図

(出典) 永島達也ら 天気 49 巻 11 号 (2002)

上記の概念に基づいた成層圏モデルは、大きくは、化学気候モデル (Chemistry-Climate Model : CCM) と化学輸送モデル (Chemical Transport Model : CTM) の 2 つに分類される。それぞれの特徴は次の通りである。

化学気候モデル：

化学成分の分布、気温分布、風速分布をモデル内で直接計算することで、例えば化学成分の量が増加→放射フラックスの変化→気温分布の変化→化学成分の生成量・消失量の変化、といった様なフィードバックを扱うことが可能であり、例えばCO<sub>2</sub>の増加に伴うオゾン層の応答などを議論する際に有効である。

化学輸送モデル：

物質輸送に係わる風速分布や気温分布を、気象観測値や客観解析データなどを利用して外部変数として与えて、化学成分分布などを計算する。例えばオゾンの生成・消滅に係わる化学プロセスを含む場合と含まない場合（トレーサー実験）との差から、化学プロセスによるオゾンの生成量・破壊量を議論する際に有効である。

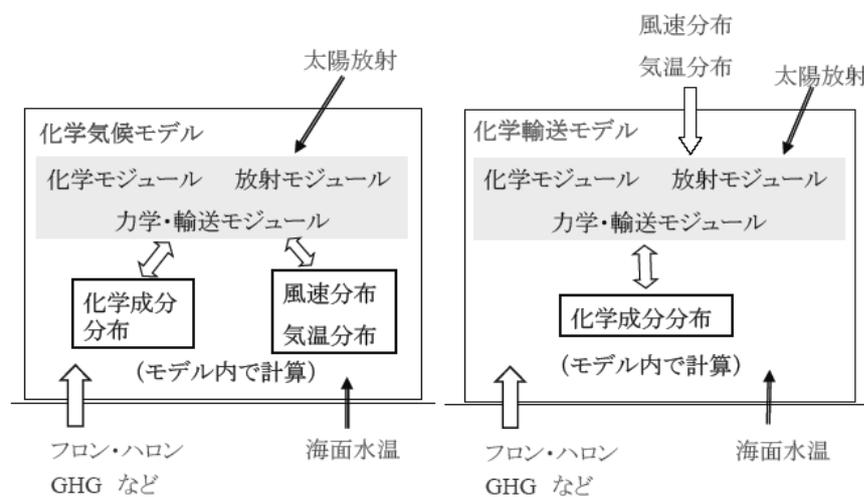


図1-資-13 化学気候モデルと化学輸送モデルの入力変数と予報変数の違い

外から中に向かって矢印で示された部分（「太陽放射」「風速分布・気温分布」「フロン・ハロン・GHG など」「海面水温」）は各モデルの入力変数であり、四角で囲った変数は予報変数である。

## 第2部 特定物質等の大気中濃度 参考資料

### 参考資料 1. 特定物質の特徴と用途

#### CFCとHCFC

**(参考) フロンとは**

フロンとは、炭素、フッ素、塩素及び水素からなる化合物である。フロンという総称は日本のみで使われ、CFC（クロロフルオロカーボン）とHCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）がある。また、これらの代替物質として、オゾン層を破壊しないものの温室効果の高いHFC（ハイドロフルオロカーボン）があり、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）では、CFC、HCFC、HFCをあわせてフロン類と定義している。

フロンの特徴は、圧力を加えたり減らすことによって、常温で容易に気体から液体、液体から気体に変化する点である。フロンは1930年に米国で電気冷蔵庫の冷媒として開発された。当時冷媒として使われていたアンモニアやクロロメタン（塩化メチル）などは可燃性や腐食性などがあり、毒性も強かったため、フロンはそれに代わる物質として普及した。

また、比較的毒性が低いこと、不燃性であること、熱に対しても化学的にも安定で分解しにくいことなどの性質から、エアコン等の冷媒、電子部品等の洗浄剤、建築用や冷凍冷蔵機器の断熱材に使用される硬質ウレタンフォームなどの発泡剤、スプレーの噴射剤など、日常生活の中で広く使用されてきた。

日本では、オゾン層保護法によってCFCは1995年末までに生産が禁止され、HCFCは生産量が段階的に削減されている。ただし、それ以前に製造され、製品中に残留して現在も使用されているものも多い。

表2-資-1 フロンの主な用途

	主な用途
CFC-11	ビルの空調機等の冷媒、断熱材の発泡剤、ぜん息治療薬用噴霧吸入器の噴射剤
CFC-12	断熱材の発泡剤、業務用冷凍空調機器の冷媒、家庭用冷蔵庫の冷媒、飲料用自動販売機の冷媒、カーエアコンの冷媒、ぜん息治療薬用噴霧吸入器の噴射剤
CFC-13	冷媒、工業原料
CFC-112	電子機器や精密機器の洗浄剤
CFC-113	電子機器や精密機器の洗浄剤、工業原料
CFC-114	ぜん息治療薬用噴霧吸入器の噴射剤、スプレー噴射剤、工業原料
CFC-115	業務用冷凍空調機器の冷媒
HCFC-21	工業原料
HCFC-22	断熱材の発泡剤、業務用冷凍空調機器の冷媒、飲料用自動販売機の冷媒、家庭用ルームエアコンの冷媒、スプレー噴射剤、フッ素樹脂の製造用原料
HCFC-123	大型冷凍機用の冷媒、工業原料
HCFC-124	冷媒
HCFC-133	工業原料
HCFC-141b	断熱材の発泡剤、電子機器や精密機器の洗浄剤
HCFC-142b	断熱材の発泡剤、工業原料
HCFC-225	ドライクリーニング溶剤、電子部品などの精密部品の洗浄剤

(出典) 環境省 化学物質ファクトシート 2012年度版

## ハロン

炭素、フッ素、塩素及び水素の化合物であるフルオロカーボンのうち、塩素の一部が臭素に置き換わったものがハロン類である。ハロン類は、1960年代後半からアメリカにおいて研究開発が進められ、1970年にはガス系消火剤として実用化された。我が国では1971年に消防法に基づく特例措置としてハロン類の使用が認められ、ハロン類の使用が急速に増えた。ハロン1301、ハロン1211はともに常温で気体であり、ハロン2402は常温で液体である。いずれも消火剤として用いられるが、ハロン1301が最も多く使用されている。

ハロン類が急速に普及した主な理由は、消火後に物が汚れたり傷ついたりすることがなく、電気絶縁性が問題となる施設でも使用できる長所があることや、消火能力にすぐれ、二酸化炭素に比べて少量で消火できるため、ハロン類の貯蔵設備や容器を小型にできることである。また、ハロン類は人体に影響を及ぼす濃度よりも低濃度で消火するため安全性が高い点も普及した理由である。

このため、ハロン類を用いた消火設備は、地下駐車場、航空機や船舶、ライフライン等の維持管理に必要なコンピュータ室や通信機器室、美術品展示室などの施設に広く採用されてきた。

日本では、オゾン層保護法によって、ハロン類の製造は原則として禁止されているが、それ以前に製造されたものは現在でも使用されている。

代替物質の開発が進められているが、ハロン類に完全に代わる消火剤は現在も開発されていないため、ハロンバンク推進協議会（現「消防環境ネットワーク」）が1993年に設立され、ハロン類の適正な管理と回収、リサイクルハロンの活用によって必要量の供給が行われている。

## 四塩化炭素

四塩化炭素は、炭素と塩素からなる有機化合物で、水に溶けにくく、常温では揮発性が高い無色透明の液体である。不燃性であり、消火効果が高い薬剤として古くから知られ、19世紀後半には割れやすいガラス容器に四塩化炭素を入れて火災に投げ込む方法で消火に利用されたり、20世紀前半にはポンプ式消火器の消火剤にも使われていた。20世紀後半に入ってから、主にフロン類の製造原料として使われたり、溶剤、機械洗浄剤、殺虫剤の原料などとして利用されてきた。

日本では、オゾン層保護法によって、原則として製造が禁止されている。ただし、試験研究や分析用などの特別な用途、又は他の化学物質の原料として使用するための四塩化炭素の製造は認められている。また、製造が禁止される以前に製造されたものは、現在でも使用されている。現在は、四塩化炭素のほとんどは、他のクロロカーボン、農薬、フッ素系ガスなどの原料として使われている他、試薬としてもわずかだが使われている。

## 1,1,1-トリクロロエタン

1,1,1-トリクロロエタン（別名メチルクロロホルム）は、塩素を含む有機化合物で、水に溶けにくく、また常温では揮発性が高い無色透明の液体である。かつては電気・電子、輸送機器、精密機器等、幅広い工業分野で金属洗浄用に使われていた。これは、金属洗浄用に多用されていたトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンの有害性が問題となったことから、それらの代替品としての需要が増えたことによる。この他、ドライクリーニング用溶剤、繊維のシミ抜き剤、また印刷工程で印刷製版を仕上げる際などにも使われていた。

日本では、オゾン層保護法で製造が禁止されている。ただし、試験研究や分析用などの特別な用途、あるいは代替フロン（HCFC141b や HCFC142b など）など、他の化学物質の原料として使用するのための 1,1,1-トリクロロエタンの製造は認められている。また、それ以前に製造されたものは、現在でも使用されている。

## HBFC

我が国での使用実態はない。

## プロモクロロメタン

我が国での使用実態はない。

## 臭化メチル

臭化メチルは、常温で無色透明の気体で、畑やハウス栽培などで主に土壌用の殺虫剤として利用される農薬の有効成分（原体）である。通常は加圧されて液化ガスとして貯蔵、輸送される。液化臭化メチルは、加圧が解かれると速やかに揮発するが、空気より重いため、拡散したり希釈されにくい。缶入りの液体臭化メチルは、畑地の農業用シートなどの下で缶を開けて揮発させ、そのガスを土壌中に広がらせる。

対象となる作物は幅広く、スイカ、メロン、キュウリ、イチゴ、トマト、ピーマン、ショウガや花き類などがあげられる。また、つる割病、立枯病、根腐病、青枯病、カビ、ウイルスやセンチュウなど、広範囲の病害虫に対して殺虫・殺菌効果があるため、多用されてきた。日本では、オゾン層保護法によって原則として 2005 年には臭化メチルの製造が禁止されている。ただし、一部の農作物については技術的、経済的に代替が困難で、臭化メチルの使用が不可欠であることから、2006 年以降も例外的に製造を認められてきたものの、2013 年にはこれらの製造についても全廃している。

また、臭化メチルは、検疫用にも使われている。農作物の輸出入の際に病害虫が侵入したり広まったりしないように、倉庫などに農作物を入れて消毒する。検疫と出荷前処理に用いるための製造については規制の対象外となっている。

臭化メチルは自然発生源をもつ物質である。以前の研究では自然発生源は熱帯域に集中しているとされていたが（WMO, 2011）、最近の研究では、熱帯植物が臭化メチルを放出するのと同じ程度吸収しており、熱帯域における臭化メチルの発生量を定量化するのは困難であることが示されている（WMO, 2015）。なお、残りが人為起源の臭化メチルだが、これには例外的な使用分や検疫と出荷前処理に用いるための使用分が含まれている。人為起源の臭化メチルの総量は、全臭化メチルの 20%程度を占める（WMO, 2015）。

## HFC

HFC(ハイドロフルオロカーボン)はオゾン層破壊物質である CFC、HCFC の代替として冷媒などに用いられてきたが、HFC は、オゾン層を破壊しないものの、二酸化炭素の 100 倍から 10,000 倍以上の大きな温室効果がある。そのため国際的に注目されるようになり、「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」において 2016 年に改正(キガリ改正)が採択され、HFC も同議定書の段階的削減の対象となった。

## 参考資料2. 都道府県・政令指定都市のオゾン層破壊物質等の観測状況

表2-資-2 都道府県・政令指定都市におけるオゾン層破壊物質等の観測の状況(令和元年度)

北海道	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HCFC-22, HCFC-123, HCFC-141b, HCFC-142 b, HCFC-225ca, HCFC-225cb, HFC-134a, 臭化メチル
岩手県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HCFC-22, HCFC-141b, HCFC-142b, 臭化メチル, HCFC-123, HCFC-225
茨城県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HCFC-22, HCFC-123, HCFC-141b, HCFC-142b, HCFC-225ca, HCFC-225cb, HFC-134a
群馬県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HCFC-22, HCFC-141b, HCFC-142b, HCFC-123, HCFC-225ca, HCFC-225cb
埼玉県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HCFC-22, HCFC-141b, HCFC-142b, HFC-134a
千葉県	CFC-11, CFC-113, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン
東京都	CFC-12, CFC-114, CFC-113, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HCFC-22, HCFC-123, HCFC-141b, HCFC-142b, HCFC-225ca, HCFC-225cb, 臭化メチル
山梨県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン
長野県	HFC-134a, HCFC-22, HCFC-142b, HCFC-123, HCFC-141b, HCFC-225ca
愛知県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HCFC-22, HFC-134a, HCFC-141b
奈良県	四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン
山口県	CFC-11, CFC-12, CFC-113
徳島県	四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン
香川県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, HCFC-22, HFC-134a
福岡県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, 臭化メチル
沖縄県	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン
千葉市	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン
横浜市	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HFC-134a, HCFC-22, HCFC-142b, HCFC-123, HCFC-141b, HCFC-225ca, HCFC-225cb, 臭化メチル
川崎市	CFC-11, CFC-12, CFC-113, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, HCFC-22, HCFC-141b, HCFC-142b, HFC-134a
広島市	CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, 四塩化炭素, 1,1,1-トリクロロエタン, ブロモメタン HFC-134a, HCFC-22, HCFC-123, HCFC-141b, HCFC-142b, HCFC-225ca, HCFC-225cb,
福岡市	CFC-11, CFC-12, CFC-113

### 参考資料3. 成層圏における特定物質の高度分布

1981年以降、東京大学等により岩手県三陸の宇宙科学研究所（現、宇宙航空研究開発機構）大気球観測所から揚げた大気球によって採取した成層圏大気について、様々な特定物質の濃度の高度分布のデータが得られ、成層圏における分布と挙動が明らかにされている。

そのうち、2000年の三陸上空におけるCFC-11、CFC-12、CFC-113、CFC-114の高度分布を図2-資-1に示す。最も安定で分解しにくいCFC-114は、高度による変化は小さい。CFC-12とCFC-113は紫外線に対する吸収係数が類似しており、上空で同じような割合で分解し減少する。一方、CFC-11は吸収係数が大きいいため成層圏に入ると最も分解しやすく、高度による減衰が著しい（高度約5kmごとに1/10に減少し、成層圏内の10kmで99%が分解して成層圏内に塩素原子を放出していることを示している）。

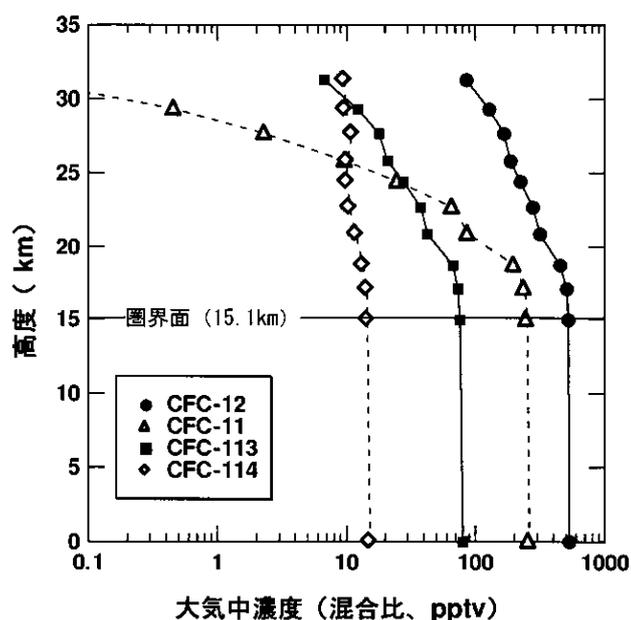


図2-資-1 三陸上空におけるCFC-11、CFC-12、CFC-113及びCFC-114の高度分布  
(2000年8月28日)

(出典) 東京大学提供データ

## 第3部 太陽紫外線の状況 参考資料

### 参考資料 1. 紫外線対策への UV インデックスの活用方法

2002年7月に、WHO、WMO、UNEPなどは共同で、「UVインデックスの運用ガイド」を刊行し、UVインデックスを活用した紫外線対策の実施を推奨している（WHO,2002）。我が国でも、2003年に環境省から、紫外線対策の普及を目的として、保健師などを対象に「紫外線環境保健マニュアル」が刊行されている（2020年改訂）。

UVインデックスは0から11+の値で表され、さらに5つのカテゴリーに分けてカテゴリーごとの対処法が示されている（表3-資-1）。参考に、国内3地域の7月の時刻別UVインデックスを図3-資-1に示す。時刻別UVインデックスは月最大値の平均値で、天候等によっては例年この程度の値になる。札幌を除き、正午を挟む数時間はUVインデックスが8（非常に強い）を超えていることがわかる。

なお、図3-資-1(2)に、日本付近の日最大UVインデックスの季節別分布（1997～2008年の平均値）を示しているのので、合わせて参考にされたい。

表 3-資-1 UV インデックスに応じた紫外線対策

UV インデックス	強度	対策
0～2	弱い	安心して戸外で過ごせる。
3～5	中程度	日中はできるだけ日陰を利用しよう。
6～7	強い	できるだけ、長袖シャツ、日焼け止めクリーム、帽子を利用しよう。
8～10	非常に強い	日中の外出はできるだけ控えよう。
11+	極端に強い	必ず、長袖シャツ、日焼け止めクリーム、帽子を利用しよう。

※UVインデックスは観測値を四捨五入した値のためゼロも入る。

（出典）Global solar UV index - A practical guide - 2002（WHO）

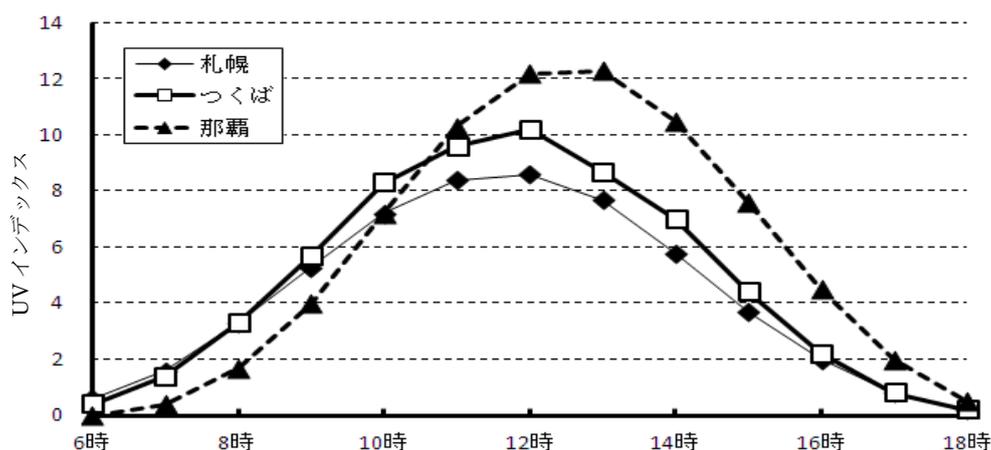


図 3-資-1 (1) 国内 3 地点における時刻別 UV インデックスの月最大値の平均値 (1994～2008 年の 7 月)

（出典）気象庁提供

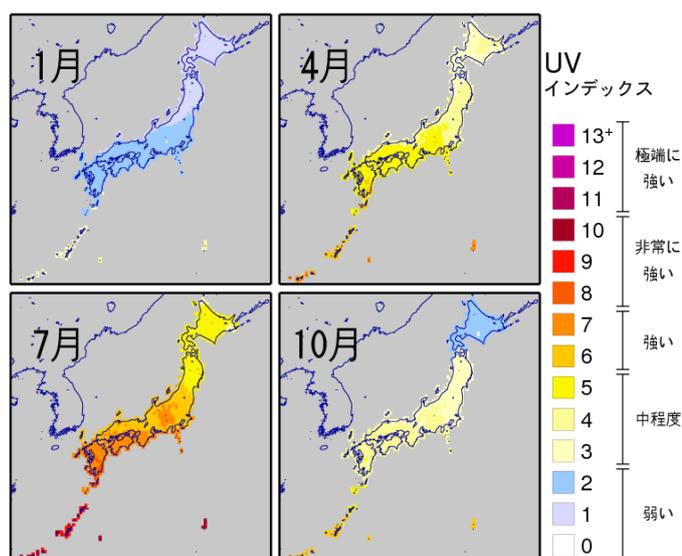


図3-資-1(2) 日本付近の日最大UVインデックスの月別分布  
1997～2008年の平均値を示す。(出典) 気象庁提供

気象庁では、地域別に紫外線予測を行い、UVインデックスとして公開している。また、国立環境研究所では、有害紫外線モニタリングネットワークの観測サイトの11箇所の速報値をUVインデックスとして公開している。

(紫外線に関する情報については下記のホームページにて一般に公開されている)

- ・ 環境省「紫外線環境保健マニュアル」(2020年改訂)  
<http://www.env.go.jp/chemi/matsigaisen2020/matsigaisen2020.pdf>
- ・ 気象庁「紫外線情報分布図」(紫外線の予測分布図)  
<https://www.data.jma.go.jp/env/uvindex/>
- ・ 国立環境研究所「UVインデックス」  
[http://db.cger.nies.go.jp/gem/ozon/uv/uv\\_index/index.html](http://db.cger.nies.go.jp/gem/ozon/uv/uv_index/index.html)

## 参考資料2. 実効オゾン全量と UV-B 強度の関係

「太陽高度とオゾン全量の変化による紫外線強度および紫外線量の変化」の項で述べたように、地表面で観測される UV-B 紫外線強度は太陽高度が高いほど増加し、オゾン全量が多いほど減少する。ここで、オゾン全量、太陽高度、UV-B 強度の関係について詳しく述べる。

オゾン全量とは、地表面から真上（鉛直方向）の大気中に存在するオゾン量の全量を意味する。UV-B は、地表面に届くまでに大気中に存在するオゾンによる吸収によって、その強度は減少するため、大気中に存在するオゾン量が多いほど UV-B 強度は小さくなる。一方、太陽光が地表面に届くまでに通過する大気層の厚さは、太陽高度に依存し、太陽高度が高い場合の大気層の厚さは、太陽高度が低い場合に比べて薄い（太陽光が大気中を通過する距離が短い）。そのため、オゾン全量が同じ場合でも、太陽高度が高いと太陽光が通過する大気層が薄く、そこに存在するオゾン量が少ないため、太陽高度が低い場合に比べて地表面に届く UV-B は強くなる。

そこで、太陽高度を「大気路程」（air mass：太陽光が通過する大気層の厚さ）で表し、大気路程にオゾン全量を乗じた「実効オゾン全量」という指標を用いることにより、オゾン全量が紫外線量に与える影響を、太陽高度の影響を含めて評価をすることが可能となる。

図 3-資-2 に、つくば上空のオゾン全量（NASA 衛星データ TOMS 及び OMI）と正午（つくば南中時）の大気路程（大気路程最小値）及び実効オゾン全量（大気路程×オゾン全量）を示した。オゾン全量が春季に高濃度を示した後、秋季にかけて減少し再び増加するのに対して、実効オゾン全量は太陽高度（大気路程）の影響を受けて、7月～8月に最低、12月に最高となる季節変化を示す。

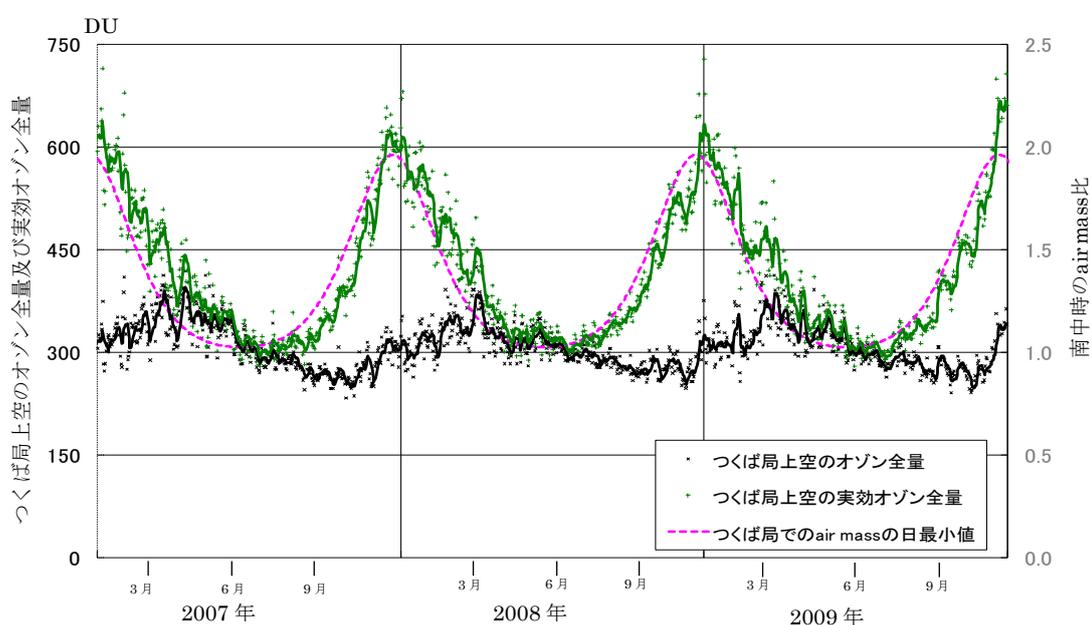


図 3-資-2 実効オゾン全量の特徴

黒の点は 2007～2009 年のつくば局上空のオゾン全量（NASA 衛星データ）、黒太線はその 7 日間の移動平均を示す。破線はつくば局での大気路程の日最小値を表す（右縦軸：太陽が真上（90°）にある時の大気路程を 1 とした時の相対比）。さらに、オゾン全量に大気路程を乗じたものが実効オゾン全量（正確には日代表値）で、緑色の点で示されている。緑色の線は実効オゾン全量の 7 日間移動平均値を表す。（出典）国立環境研究所提供データ

図 3-資-3 に、有害紫外線モニタリングネットワークの一環で国立環境研究所が実施する 3 観測

局（陸別（北海道）、つくば（茨城県）、波照間（沖縄県））における実効オゾン全量と紫外線（UV-B）の変化を示した。この図からは、地区、季節を問わず、実効オゾン全量と UV-B 量がきれいな逆相関を示していることが分かる。紫外線の季節変動は、実効オゾン全量を用いることにより明瞭に説明が可能となる。

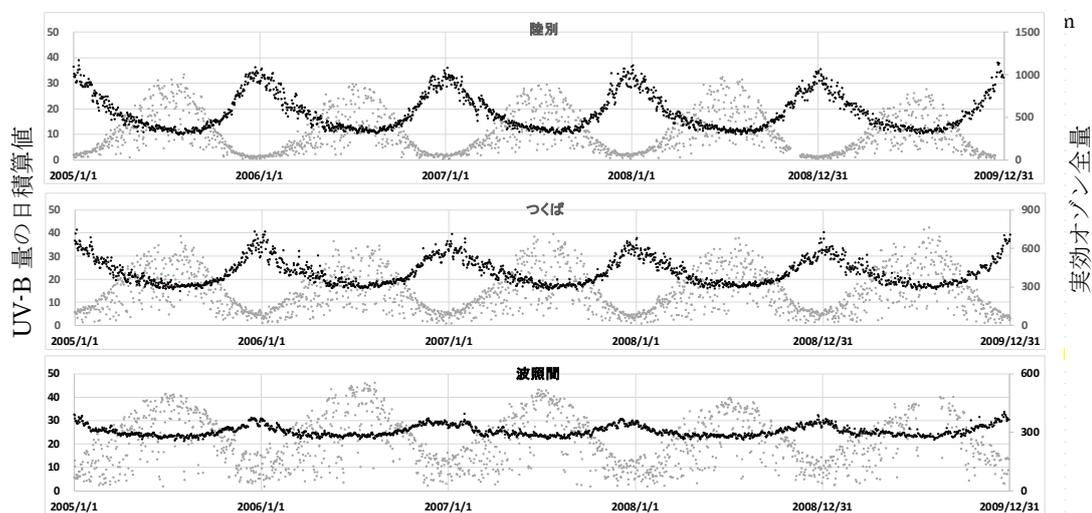


図 3-資-3 実効オゾン全量と UV-B 量の推移（2000～2009 年）

灰色の点（左縦軸）は UV-B 量の日積算値、黒点（右縦軸）は実効オゾン全量である。オゾン全量は衛星データを使った。（出典）国立環境研究所提供

### 参考資料3. 雲量による紫外線量の割合の変化

「雲による影響」の項で、快晴、晴、薄曇、曇、雨と天気の変化するにつれ、UVインデックスが減少していくことが示された。図3-資-4には、雲量別(0:快晴、5:晴れ、9:曇り)にオゾン全量とCIE紅斑紫外線量/全天日射量(比)の関係を示した。雲量が大きくなるにつれてCIE紅斑紫外線量/全天日射量(比)が大きくなることが示されている。これは、雲量が増えるに従い、全天日射量、UV-A量、UV-B量は減少する(UVインデックスが小さくなる:図3-1-3)が、全天日射量に占めるCIE紅斑紫外線量の割合が高くなることを意味する。

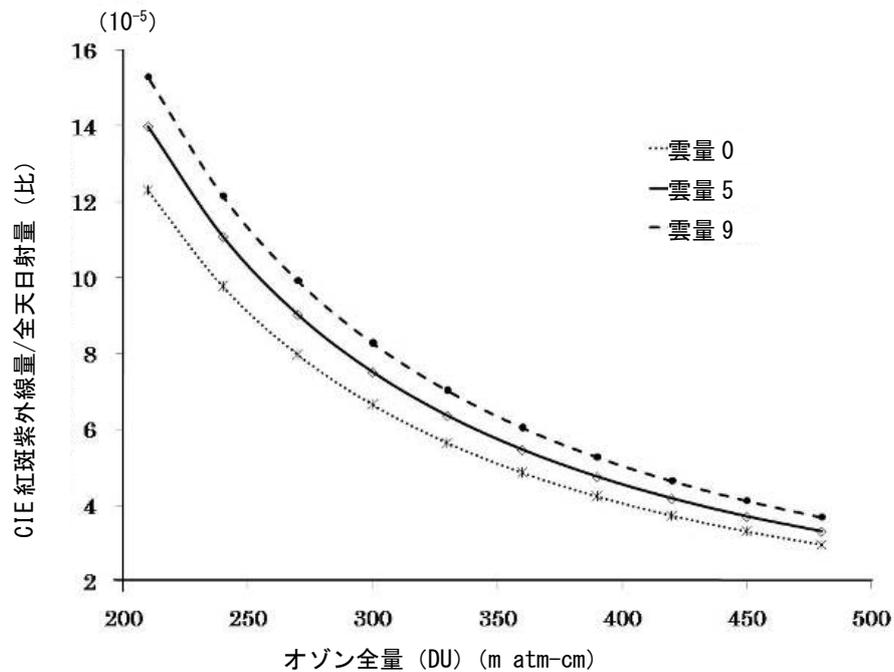


図3-資-4 オゾン全量とCIE紅斑紫外線量/全天日射量(比)の関係  
鹿児島で午後3時に観測されたオゾン全量とCIE紅斑紫外線量/全天日射量(比)を示す。

(出典) 国立環境研究所提供

## 参考資料4. 紫外線による人の健康への影響

### (1) 紫外線の皮膚への影響

太陽紫外線は皮膚細胞内外の多種の物質に吸収され生物反応を惹起する。特に UV-B は細胞遺伝子 DNA にシクロブタン型 2 量体 (cyclobutane pyrimidine dimer:CPD) を生成することで独特の傷を与え、遺伝子変異を誘発する。

夏の正午ごろに太陽紫外線を 20~30 分も浴びると、数時間後から皮膚が赤くなり始める。サンバーンの始まりである。赤くなるのは皮膚血流量の増加によるものだが、その引き金は、主に UV-B による表皮角化細胞の遺伝子に生じた傷である。傷は速やかに修復されるが、残存すると血管を拡張させる物質(プロスタグランジンや一酸化窒素)を生成し、血流を増やす。皮膚が黒くなるサンタンもまた、少なくとも一部は遺伝子の傷が引き金となっている。また、一度では皮膚が赤くならない少量の紫外線(夏の正午ごろの太陽光線を約 10 分)を毎日続けて浴びると、1 週間後には皮膚は日焼けでうっすらと赤くなる。その表皮角化細胞を調べると、遺伝子にたくさんの傷が蓄積していることが確認されている。さらに近年、サンバーンの原因として、RNA が UV-B を吸収して生じる miRNA が自然免疫に関連する受容体 (toll-like receptor) を介して、さらに、表皮角化細胞質のアミノ酸であるトリプトファンが UV-B を吸収して生じる物質が arylhydrocarbon 受容体 (AhR) を介して、また、AhR の構成成分の一つである pp60<sup>src</sup> が細胞膜受容体 EGFR を介して遺伝子発現を変え、炎症を惹起することが明らかにされている。

長年太陽紫外線を浴びる結果、20 歳を過ぎるとアジア人では、慢性障害として光老化と呼ばれる皮膚症状が出始める。一方、波長の長い UV-A は UV-B に比較し CPD 生成は千分の一程度であるが、皮膚の免疫抑制や光老化の原因となる。また、UV-B と UV-A は細胞膜にも作用し、細胞の働きを変える。

### (2) 太陽紫外線を長年浴びて現れる光老化と皮膚腫瘍

光老化(ひかりろうか)とは、小児期から長年太陽光線を浴びた皮膚に見られるシミ(小さな色素班で日光黒子と呼ぶ)やシワなどの皮膚の老化症状である。日光を浴びない皮膚の老化に比べると、光老化は若い年齢で現れ、約 80%は太陽紫外線が原因と考えられている。日光を浴びない皮膚の老化に比べ、真皮上層には、光老化特有の変性した弾性線維が蓄積されており、日光性弾力線維変性症と呼ばれている。シミは主に UV-B で生じるが、シワは UV-B と UV-A が原因で発症する。日本人の場合、日焼けにより表皮にメラニンが生成され小麦色になるため、遮光効果が高まり、その後の UV-B による遺伝子の傷 CPD 生成が少ないので皮膚がんになり難いと考えられている。更に平均寿命が短かったこともあり、わが国では、1970 年中ごろまでは、紫外線の皮膚への健康障害については、一般にはほとんど注意は払われていなかった。しかし、1980 年代に入りフロンガスによるオゾン層破壊がきっかけとなり、わが国でも紫外線が健康に与える悪影響が注目され始めた。また、日本人でも皮膚がんの一步手前の日光角化症と呼ばれる前がん症が急速に増えてきた。

1980 年代になると、南半球のオーストラリアでは、教育の場で子どもに太陽紫外線の有害性を教え、紫外線から皮膚を守る方法を教え始めた。わが国でも 1980 年代中ごろを過ぎると、

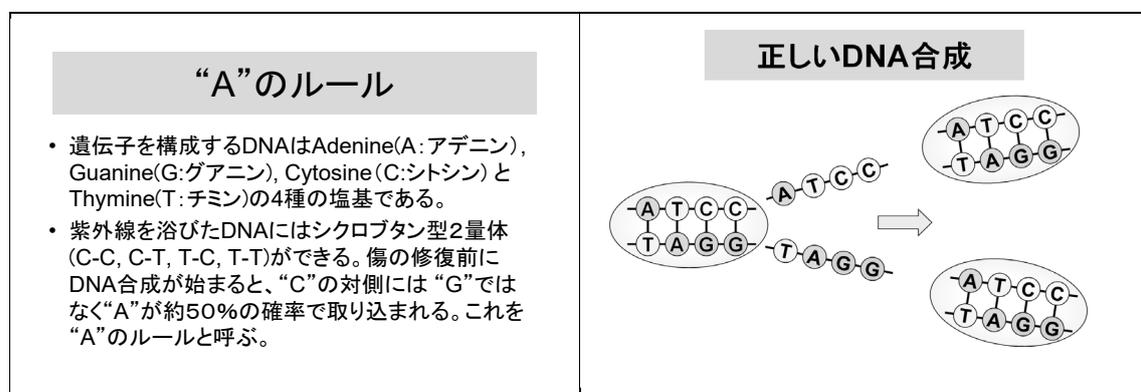
[<<最初のページへ戻る](#)

子供の紫外線対策にも注意が注がれ、1998年には母子健康手帳から「日光浴」の項目が削除された。時期を同じくして、紫外線の慢性ばく露による障害、光老化は防ぐことができる皮膚の老化症状であるとの立場から、わが国の皮膚科医師の間でも基礎・臨床研究が盛んになり始め、シミやしわの治療が全国で広く行われるようになり今日に至っている。

光老化症状でもシミが一番早く症状として表れる。早い人では20歳過ぎから顔や肩から背中にかけて、強い日焼けを繰り返した皮膚にシミが出始める。しわは30歳ころから出始め、皮膚の良性腫瘍（脂漏性角化症：顔など日光ばく露皮膚にできるいぼのようなざらざらした米粒ほどの小さな、薄い褐色の皮疹）が40歳ころから出始める。光老化症状は小児期から上手に紫外線と付き合い合えば発症を60歳から80歳頃まで遅くできる。高齢国家のわが国では、子どもの紫外線対策をいっそう広める時期に来ていると皮膚科の専門家は考えている。

### (3) 太陽紫外線によるDNA損傷と“A”のルール

遺伝子DNA (deoxyribonucleic acid: DNA) は、糖とリン酸で作られた2本の鎖の間に、丁度電車の線路の枕木のように、アデニン (adenine:A) とチミン (thymine:T)、グアニン (guanine:G) とシトシン (cytosine:C) が手を結んで、線路を結び付けている。つまり2本の線路はA-TとG-Cの2種類の手をつなぎ方で作られている。細胞が分裂するときには、枕木はすべて外され、2本の線路となる。1本の線路上の塩基がAなら、体側にTが、また、Cならば体側にGが手をつなぎ、分裂前と同じ遺伝子配列の細胞が生まれる（図3-資-5）。UV-CとUV-Bは1本の線路上に並ぶC-CやC-Tに効率よく吸収され、対側の鎖との手を切って、隣同士で手をつなぎC=CとC=Tとなる。これが紫外線による独特の傷で、シクロブタン型ピリミジン2量体 (cyclobutane pyrimidine dimer: CPD) と呼ばれている。皮膚細胞は、24時間でこの傷の約半数を元通りに修復する仕組みを持っている。しかし、傷の数が多いと一部の傷を残した状態で、細胞分裂の準備をしなくてはならない。たとえば、C=Cの傷を残してDNA合成を始めると、C=Cの対側に誤った塩基が挿入される可能性が50%もある。これが、Aのルールと呼ばれ、紫外線を浴び続ける表皮細胞の遺伝子に突然変異が生じる仕組みと考えられている。どの遺伝子に変異が生じるかで、慢性障害としての光老化(シミ)は20歳過ぎから、また、皮膚腫瘍(良性、前がん症、悪性)が40歳ころから発生する。高齢社会日本では、高齢者の若さと健康を維持するためには、小児期からの紫外線防御が極めて重要と考えられる。



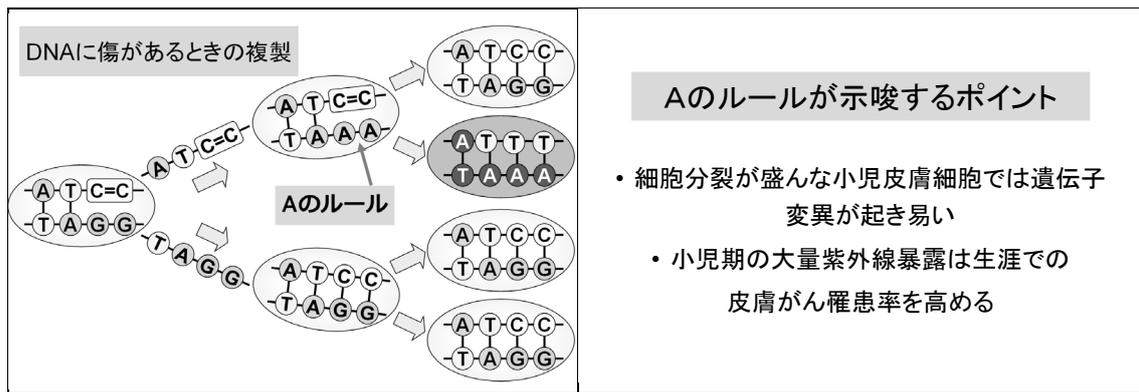


図 3-資-5 “A”のルール

#### (4) 紫外線による免疫抑制のメカニズム

皮膚は最外層にあり、外来物質や感染生物の侵入を阻止する重要な働きを持っている。紫外線が皮膚の免疫反応を抑制することが発見されてから 30 年以上が過ぎ、近年その生物作用についての新しい解釈が生まれている。

紫外線による免疫抑制が発見された当初は、腫瘍発症をターゲットにした免疫抑制機構が研究された。紫外線で生じたマウスの皮膚がんを同系統のマウス皮膚に移植すると免疫反応により腫瘍が拒絶されるが、移植の数日前に紫外線を照射した皮膚に移植すると腫瘍が成長する現象が報告された。その後、皮膚に塗布される化学物質に対するアレルギー反応も UV-B の前照射で抑制されることが明らかにされた。

これらの抑制反応は、紫外線を浴びたのち 10 日間以内の移植や皮膚塗布で起きたが、それ以降では抑制は起きなかった。つまり、紫外線を浴びて 10 日を過ぎると免疫抑制効果は消失していた。さらに紫外線量が少量の場合には、紫外線を浴びた皮膚に限局した抑制反応を示し、大量では紫外線を浴びていない皮膚でも抑制反応が観察された。この抑制機構には、表皮において免疫反応を担うランゲルハンス細胞の機能が障害され、免疫反応を抑制するように働くサプレッサー T 細胞が誘導されるためと説明されてきた。また、この反応の引き金は、細胞遺伝子 DNA の傷、あるいは表皮に存在し免疫反応を抑制する働きを持つウロカニン酸によるものと考えられ、表皮細胞の 90% 以上を占める角化細胞から生成放出されるサイトカイン（細胞が作り出す物質で、作った細胞自身の他、多くは周りの細胞に働きかけてその働きを変える）の一つである免疫反応を抑制する作用を持った IL-10（インターロイキン-10）がリンパ球に働き、免疫抑制反応を誘導すると説明されてきた。

その後研究が進み、現在では、角化細胞が発現するサイトカインの一種である RANKL（receptor activator of NFκB ligand）が炎症反応時には増加し（UV-B 照射時にも増加する）、骨髄由来のランゲルハンス細胞の受容体 RANK（RANKL が結合するアンテナのようなもの）を介してランゲルハンス細胞を刺激し、免疫反応を抑制する働きを持つ IL-10 を生成放出させ、免疫反応を抑え込むリンパ球である抑制性 T 細胞（T-reg）が増加し免疫抑制が起きると理解されている。

### (5) 紫外線による免疫抑制効果

紫外線の免疫抑制効果で人の健康に与える影響として最も重要なのは感染症への影響である。現在までに、細菌、真菌やウイルスの感染に対する紫外線の抑制効果が、小動物を用いて広く研究され、紫外線で感染症は重症化し早期に死亡することが確認されている。しかしながら、人を対象とした感染症を誘発させる研究は倫理的にできないため、疫学的研究が主となってきた。その一つは、ヘルペスウイルスによる単純疱疹の再発が紫外線ばく露後に好発すること、また、乳頭腫ウイルスによる皮膚がんの発症も紫外線ばく露部位に好発することなどである。また、ワクチンの予防接種を施行する季節が抗体産生に与える影響の解析から、紫外線ばく露により接触皮膚炎と自然免疫の主要因子である NK 細胞の活性は抑制されるが、B 型肝炎ウイルスに対する抗体価には影響しなかったと報告されている。

紫外線による免疫抑制は皮膚の過剰な免疫反応であるアレルギー反応を抑制することから、現在では本来人には必要な機構ではないかと考えられるようになってきている。紫外線で誘導される抑制性 T 細胞 (T-reg) は、体の免疫機構が自分の細胞や組織を攻撃する結果生じる自己免疫反応の発症を抑制する働きがあることから、紫外線による皮膚の免疫抑制は皮膚を介して常時起きる可能性がある物質に対する過剰反応を避けるために必要な機序とも考えられる。

また、紫外線による免疫抑制は、健康な人では何らの変化も生じない太陽光線で、皮膚に異常な反応が起きる病気である光線過敏症に罹患しないための仕組みの可能性がある。日光に当たる皮膚にかゆみのある皮疹が出る多型日光疹患者の場合は、6MED (皮膚がうっすらと赤くなる最少紅斑量の 6 倍の UV-B 量) の大量の紫外線を浴びると、表皮で免疫反応を担う表皮ランゲルハンス細胞が減少しにくくなる特性に加え、真皮の多核白血球 (RANKL を発現) の浸潤が少なくなることで、免疫反応を抑制するサイトカイン IL-10 の発現が不活発となり、アレルギー反応が起きやすいと考えられている。

### (6) 皮膚タイプによる紫外線による影響の違い

色白で赤くなりやすいタイプの人には色黒で赤くなりにくいタイプの人に比べ、同量の紫外線で 2 倍ほど免疫抑制を受けやすい。UV-B による遺伝子の傷も赤くなりやすい人はなりにくい人に比べ 3 倍ほど多い。これらの結果は紫外線で赤くなりやすい人は赤くなりにくい人に比べ、紫外線による皮膚がん罹患しやすいことを示唆している。

### (7) 紫外線による人体への悪影響と好影響

紫外線による人の健康への悪影響としては、急性的な影響 (日焼け、免疫抑制、角膜炎など) と慢性的な影響 (光老化、皮膚がん、白内障など) が指摘されている。一方で、日光を浴びることで体内でビタミン D が合成される。図 3-資-6 には、①悪影響 (浴びすぎ) の例として日焼け (紅斑作用) と紫外線の関係と、②不十分な場合の例としてビタミン D 合成阻害と紫外線との関係を 1 つの図に示した。

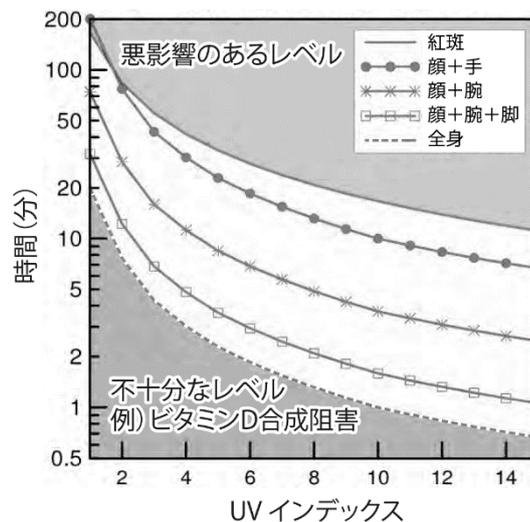


図3-資-6 UVインデックスと紫外線による影響の例（白人種）

肌の色により皮膚への障害及びビタミンD合成に必要な時間は異なる。図に示した曲線は白人種（1MED（皮膚がうっすらと赤くなる最少紅斑量） $=25\text{mJcm}^{-2}$ ）についてのものであり、日本人を対象とした研究ではないことに留意が必要である。なお、日本人の場合は、白人種に比べて一般に紫外線に対する感受性が低い。時間は悪影響の出る時間と全身または身体の一部をばく露した時にビタミンD合成に必要な時間を示す。

（出典）Environmental Effects of Ozone Depletion and Its Interactions with Climate Change: 2010 Assessment (UNEP-EEAP, 2011)

ビタミンDは、小腸内でのカルシウムとリンの吸収を促進する生理作用や、カルシウムとリンから骨を形成する（化骨）作用を有する。ビタミンDが極度に欠乏すると、発育期ではクル病や手足の骨の湾曲などに、成人では骨軟化症につながると考えられている。現在わが国で問題となっているのは、妊婦や新生児の母親のビタミンD不足であり、このような母親の母乳で育つと、小児の骨形成に異常が生じることである。

UV-Bを浴びた皮膚では、活性型ビタミンD<sub>3</sub>が生成されるので、適度に日光を浴びていればビタミンDが欠乏することはない。日本では夏の快晴日の正午頃であれば、顔、前腕、手背にわずか数分太陽光線を浴びれば、1日に必要なビタミンD<sub>3</sub>が合成される計算である。しかし、知識として重要な点は、UV-Bを長時間浴びてもビタミンDは一定量以上には、生成されない点である。たとえば、真夏の正午ごろ、30分以上太陽光線を浴びても、ビタミンDの前駆物質の7-デハイドロコレステロールが、熱反応でルミステロールなどビタミンDとは関係のない物質に転換されるため、ビタミンDが作り続けられることはなく、一方では、皮膚細胞には有害な損傷が大量に生じ、皮膚にとってはマイナスとなる。人間の体の仕組みは素晴らしい。ビタミンDは脂溶性で、体内での過剰や合成体外から取り過ぎると、体の脂肪組織にたまり、全身的な有害作用を引き起こす。そのため、過剰には作らない仕組みを持っていると考えられる。なお、図3-資-6には、全身に紫外線を浴びた場合のビタミンD合成に必要な時間を示したが、極端に紫外線ばく露量が少ないとビタミンD合成が阻害される。

一方、図3-資-6に示すように、紫外線を浴び過ぎると日焼け（紅斑）を引き起こすことが示されている。

皮膚への障害及びビタミンD合成に必要な時間は紫外線の強さ（図3-資-6のUVインデックス）に反比例する（ビタミンD合成に関しては紫外線を浴びる皮膚の面積も関係する）ほか、肌の色（スキントイプ）に依存し、紫外線に対して感受性の高い人では悪影響のあるレベル<<最初のページへ戻る

ルに達する時間は短くなる。図に示した曲線は白人種についてのものであり、色の濃い皮膚では5倍以上長くなるとされている (UNEP-EEAP, 2011)。

また、紫外線ばく露による健康影響に関しては、ばく露時期も強く関係し、成人期以降の暴露と比較して幼少期の暴露が特に健康に有害であることが指摘されている。

## (8) UV-A の有害性

### 1) 免疫抑制等に対する UV-A の影響

これまでオゾン層の減少が人の健康や地球の生態系に与える影響が盛んに研究されてきた。太陽紫外線を浴びて数時間から数日後に起きる日焼けなどの皮膚の急性反応が注目され、基礎研究が進んだ。紫外線による免疫抑制反応もその一つであるが、UV-B が免疫抑制の主役であり UV-A による免疫抑制に関しては、UV-A は UV-B による免疫抑制を阻止するとの報告もあり、研究者の間でも意見が分かれていた。しかし、近年 UV-A が、活性酸素を介した細胞障害だけではなく、直接遺伝子に働き UV-B と同様の傷を遺伝子の DNA に誘発し、皮膚がんやシミの発症にも深く絡んでいる可能性が強く示唆され、さらに免疫抑制にも強く関わるということが明らかになってきた。

さらに、UV-A は UV-B に比べ、地表に届く量は 40~60 倍も多く、冬でも夏の半分の量は届いているし、皮膚の真皮の上層に 20% も到達する。窓ガラスを透過して入ってくるのも UV-A である。太陽光線の免疫抑制効果を地表に届く紫外線量を考慮し評価すると我々の皮膚の免疫抑制には UV-A が UV-B よりも強く関与していることを示す研究成果が最近報告されている。光老化のしわは UV-A が直接真皮の線維芽細胞に働き、UV-B は表皮の角化細胞に働きかける結果と云われている。これら両紫外線の光老化作用は紫外線で生じる活性酸素が重要な働きをしているためと理解されている。すでに赤外線が活性酸素を介してしわの原因となる可能性も認められており、今後は太陽光線対策として活性酸素をいかに制御するかが研究のターゲットの一つである。UV-A の健康への悪い面がはっきりと科学的に証明されてきた今日、国民にとって UV-A 対策は皮膚がんの発症予防だけではなく、光老化や免疫の側面からも重要と考えられる。

### 2) 細胞周期に対する UV-A の有害性

UV-A は、UV-B に比べ、DNA に傷をつける強さは約 1000 分の 1 と弱いですが、地表に届く量は遥かに多い。加えて、最近、UV-A を浴びた細胞では、遺伝子に傷があっても分裂のためのサイクルは止まらないので、傷を治す時間が短く、遺伝子に変異が生じる機会が増えるといわれている。つまり、皮膚がんになりやすいと考えられる。これらの結果から、UV-A 対策は健康維持や、老化・疾病予防にとって重要と考えられる。

### 3) UV-A の糖化作用

現在、老化に関連する物質として最終糖化産物 (advanced glycation end products: AGEs) が注目されている。AGEs は酵素の働きを必要としない反応で、糖 (グルコース、フルクトースなど) がたんぱく質、脂質や DNA と結合する。その結果、代謝の遅い皮膚真皮のコラーゲンや弾性繊維の構造と機能に変化を誘発し、弾力性が低下する結果皮膚のしわやたるみの原因

[<<最初のページへ戻る](#)

になると考えられている。

#### 4) UV-Aによる光老化

長年にわたり太陽紫外線に暴露された顔面などの皮膚真皮には、光老化と呼ばれる特徴的変化（表皮は厚く真皮の弾力性が消失し、光線性弾性線維変性）がみられる。その真皮内の弾性線維には、AGEであるカルボキシメチールリジン（carboxymethyl lysine:CML）が大量に沈着している。さらに、CML化された弾性線維は、UV-Aにより生じるエラフィン（elafin）のため代謝による除去が一層困難となり、長年にわたり沈着量が増加すると考えられている。また、UV-Aにより生じる活性酸素がCML生成をさらに高める。

UV-Aは年間を通して大量に地表に届いている。また、UV-Aは窓ガラスを透過するため、室内でも窓際にいると浴びることになり、しわの原因になるので注意が必要である。日焼けの原因となるUV-B対策だけでなく、光老化を避けるにはUV-A対策が重要であることが理解できる。

#### 5) UV-Aとメラノーマ

皮膚がんの多くは紫外線誘発の遺伝子変異で発症する。特にUV-Bは遺伝子を構成する塩基に直接吸収されシクロブタン型2量体(CPD:cyclobutane pyrimidine dimer)を生成する。CPDが誤って修復されると遺伝子変異を起こす。UV-Aは、直接遺伝子DNAに吸収される性質は、UV-Bに比べ極端に低い。ところが表皮に存在する色素細胞はメラニンを作っているため、そのメラニンがUV-Aで生じる活性酸素や活性窒素に結合すると、電子が励起され、その結果CPDが生成される。さらに、UV-Aを浴びた色素細胞では、紫外線暴露が終わった後、数時間後まで連続してCPDが生成されることが明らかにされた。そのため、がんの中でも致死率が高いメラノーマが主にUV-Aが原因で発症すると考えられている。日焼けで皮膚を黒くするメラニンは、皮膚の細胞を紫外線から守る（主に表皮角化細胞の核の上に帽子のごとく乗っかり紫外線から細胞核を守りCPD生成を抑える）だけでなく、他方、メラノーマの原因になる「両刃の剣」である。UV-Aを皮膚に当て、皮膚を黒くする日焼けサロンはメラノーマの発症を高める可能性がある。

### (9) 紫外線ばく露による眼への影響

紫外線ばく露による眼への影響については、急性の紫外線角膜炎\*のほか、白内障\*\*や翼状片\*\*\*が知られている。

白内障に関しては、UNEP 環境影響評価パネル報告書（2010）において、皮質白内障については紫外線の関与が明らかであるが、核白内障については紫外線ばく露が関係することを示す知見は限られており、また、後囊下白内障に関しては紫外線との関連を示す十分な証拠はないとしている。同報告書では、翼状片に関しても、太陽光へのばく露が重要なリスク要因であることを示している。そのほか、瞼裂斑\*\*\*\*に関しても紫外線の関与が指摘されている。

眼に対する影響は、太陽からの直射日光よりも、散乱又は反射した紫外線の寄与が大きい、又は雲の存在により増幅される。そのため、気候変化の影響を受けるとしている。

### (10) 紫外線対策

多くの白色人種では、オゾン層破壊による UV-B 放射照度の増加よりも、おそらく日光ばく露に関わる行動様式の変化の方が、人の健康に重大な影響を及ぼしている。日照の多い地域への休暇旅行の増加、身体を覆う部分が少ない服の着用、日に焼けた肌になりたいという願望といったものはすべて、個人の UV-B 放射に対するばく露量が数十年前と比べて増加している要因となっている可能性が高い。このような行動様式の変化は、健康に悪影響と良い影響の両方をもたらす。なお、WHO では、多くの若者に利用されている sunbed（日本語で日焼けマシン）の利用制限（利用禁止）を求めており、その対象の一つに 18 歳以下をあげている\*\*\*\*\*。

太陽の紫外線放射への過剰ばく露を避ける方法としては、屋内で過ごす、日陰に避難する、UV カットの目的で衣服、帽子やサングラス、紫外線カットのメガネを着用する、傘をさす、日焼け止めを塗る、などがある。これらの方法で、日光ばく露の有害な影響と良い影響のバランスをとるようにする。推奨される屋外活動時間は、肌の色、年齢、服装といった個人的な要因、さらには場所、時間帯、季節といった環境的な要因に応じて、個人ごとに異なるため、実際にはそのようなバランスを達成することは難しいだろう。個人差がある中で、それぞれの人にとって最適なビタミン D 値、そしてそれを達成するのに必要な日光ばく露の量およびパターンを定義するには、現在のところ不確実性が伴う。

このような中、UV インデックスは有効な指標であり、紫外線ばく露を管理するツールとして活用するためのより一層の努力が期待される。

---

\* 紫外線に強くばく露した際に見られる急性の角膜の炎症で、雪面など特に反射の強い場所で起きる「雪目」が有名。

\*\* 眼球の中の水晶体が濁ることをいい、老化の一部である。

\*\*\* 白目の表面を覆っている半透明の膜である結膜が、目頭（めがしら）の方から黒目に三角形に入り込んでくる病気。

\*\*\*\* 白目の一部が黄色く濁って盛り上がる病気。

\*\*\*\*\* IARC では sunbed（紫外線を発する日焼けマシン）をヒトに対する発がん性あり・グループ 1 に分類している。

### 1)日陰

- ・ 紫外線ばく露を減らす最も効果的な方法は日中の光を避けることである。特に、屋内で過ごすのが効果的である。
- ・ 濃い樹木の影の利用は屋外における紫外線ばく露の防止に大きな効果があるが、海岸での日傘の効果は小さい。
- ・ 適切な日陰の作成にあたっては、紫外線の散乱、反射を最少とする材料、デザインが必要となる。
- ・ 学校における、特に昼休みの紫外線対策の効果的な一例として、校庭に特製の旗を立てることが示されている。

### 2)衣服

- ・ 織物は、覆っている場所については、紫外線のばく露を減らす効果は明らかである。
- ・ 織物に関して、紫外線ばく露効果を示す統一的な基準はないが、UPF (UV protection factor) という考え方が浸透しつつある。
- ・ 織物の紫外線透過には、生地素材、隙間、色、重さ、厚さが関係しており、伸ばし、湿り気、洗濯、湿度、気温がどのように影響するかははっきりしていない。
- ・ 傘、帽子と衣服の色は紫外線対策に加え、夏では熱中症の観点からの配慮も必要である。黒は紫外線だけでなく可視光線、赤外線も吸収するため黒い傘や帽子では頭部、顔などかなり熱く感じ、体温上昇に関与すると考えられ、真夏は避けるほうが良い。特にコロナ感染予防対策としてマスクを着用しているため熱中症になりやすい。理想の傘は、外が白で内面は黒が良い。衣服も、真夏の太陽を浴びる条件下での黒は避けるほうが熱中症対策として好ましい。涼しい季節では、内外面とも黒の傘でよい。

### 3)サンスクリーン剤

サンスクリーン剤は SPF の値 (6 から 50+) により紫外線防御効果が異なる。SPF30 のサンスクリーン剤が健康維持の目安として推奨されるケースがよく見られる。

サンスクリーン剤は、性能評価試験に用いられた用量 (2mg/cm<sup>2</sup>) ではなく、より低用量 (0.5mg/cm<sup>2</sup>) で用いられることが多く、その場合には表記された SPF の性能は認められない (SPF16→SPF2) ので注意が必要である。また、サンスクリーン剤の塗り直しが不十分なケースが少なくない。

一方で、紫外線の功罪を考慮して、SPF 値の高いサンスクリーン剤の使用を特に紫外線の強い時に限定すべき、あるいはサンスクリーン剤は UV インデックスが一定値以上の場合に使用すべき、といった対応をとる国もある。

### 4)眼の紫外線対策

紫外線放射に対する眼のばく露を避けるには太陽光を避けることが効果的だが、完全に実行することは難しい。眼に直接太陽光が当たるのは稀であるが、紫外線放射に強くさらされる場所又は地表面からの反射が強い場所では眼の保護を常に行う必要がある。

ガラス製又はプラスチック製のメガネには、紫外線カットのレンズが多く使われるよう

になってきており、サングラスではなくても UV-B 放射の全部及び UV-A 放射の大部分を吸収することができる。なお、レンズの小さいものや顔の骨格にあわないサングラスの場合、周辺の紫外線放射が側面から眼に入る可能性がある。このような時、色の濃いサングラスをかけていると、眼に入る光の量が少なくなるため瞳孔が普段より大きく開き、影響が悪化する可能性があるため注意が必要である。紫外線放射をブロックするソフト・コンタクトレンズは角膜全体を覆って、あらゆる角度から進入する紫外線放射に対して眼を効果的に保護する。

## 参考資料5. 紫外線による陸域生態系への影響

### (1) 紫外線に対する植物の対応メカニズム

UV-B 放射に対して陸域生態系は極めて多様な反応を示す。動物は UV-B 放射を避けるために移動することができるが、植物は移動することができない。しかし、それを補うように農作物及び森林樹種を含むほとんどの植物は紫外線を防御する複数のメカニズムをもっている。

DNA、タンパク質、脂質などの生命維持に必須な生体分子は UV-B 放射に対して一般に感受性が高い。しかし、UV-B が葉に当たっても、そのごく一部しか内部組織に到達することができない。研究に用いられたほとんどの植物種で、UV-B 放射は葉表皮細胞における紫外線吸収物質の合成を誘導し、UV-B 放射が葉の中の重要な生体物質に到達するのを阻止するメカニズムをもっている。また、葉の肥厚や葉を保護するワックス層を変化させることにより UV-B 放射にさらされる内部組織の比率を減らすことも知られている。しかしながら、このような遮蔽機構をかいくぐって内部に到達した UV-B によって DNA は損傷を受ける。これに対して植物は DNA の損傷を修復するいくつかのメカニズムをもっている。

DNA に紫外線が吸収されることにより形成されたシクロブタン型ピリミジン 2 量体 (CPD) は、UV-A～青色光の波長域の光をエネルギーとして、ダイマーを切断する酵素 (DNA photolyase) によって修復される。また、もう一つの主要な DNA 損傷産物である (6-4) 光産物も、損傷に特異的な酵素により光修復される。ヒトは進化の過程で、このような光修復機構を失ったと考えられている。

中～高強度の UV-B 照射による植物のストレス応答には、光合成遺伝子の発現レベルの低下及びフラボノイド生合成に関わる遺伝子、抗酸化酵素遺伝子や病原菌感染に関連した遺伝子の発現レベルの上昇などがあり、これらのシグナル伝達には UV-B により細胞内に生成される活性酸素が重要な役割を果たしていることが明らかにされつつある。一方、DNA 損傷の形成や傷害発現を伴わない比較的低線量の UV-B は、植物の成長、分化などの生活環の諸過程を制御しているが、他の種々の光受容システムと共に、その制御には UV-B に特異的な光受容体が関与していると考えられている。

### (2) 植物の対応メカニズムによる生態系への影響

紫外線は草食動物の食性と捕食者-被食者相互作用を変化させ、それが生態系における栄養相互作用、エネルギー移動、食物網を変化させる。UV-B を照射された植物では葉に含まれる生体成分の組成が変わり、植物と草食性昆虫の間の相互作用が影響を受ける。成分組成が変わった植物の葉は病害虫を含む草食生物にとって食糧としての魅力が低下し、落葉後にバクテリアや菌類などの微生物により土中で分解するスピードが変わる。このように、植物が UV-B 照射を受けると、動物の嗜好性や微生物による分解が変化し、動物への食糧供給と土壌内での栄養素の循環に影響を与えるので、生態系レベルでの影響は相当に大きなものになりうる。なお、昆虫等の消費減退の一部は昆虫への UV-B 放射の直接的影響によるものもある。UV-B 放射が強くなれば、一般的に草食動物が植物を食べる量は少なくなるが、

逆に大気中の CO<sub>2</sub>が多くなれば草食性が強まる。したがって、UV-B の放射量と CO<sub>2</sub>の将来のレベルは植物の生産と昆虫への食糧供給の両面を制御する上で重要となるであろう。

上に述べたように、UV-B に対応するための植物の変化は、植物が枯れた後の分解に影響を与える可能性がある。紫外線吸収物質生成の誘導や UV-B 放射に耐えるようにする葉の構造的変化は、葉が落ちた後も分解されにくくする。また、UV-B 放射は土壌中の微生物の構成を変化させるが、これも落ち葉の分解されやすさに影響を与えうる。落ち葉が直接太陽光にさらされると光化学的に分解されるが（光分解）、微生物と光分解の双方の分解過程の変化は将来の生態系における炭素隔離と栄養素循環に重大な結果をもたらす。このように、紫外線放射は葉の生化学（成分組成）と微生物の多様性の変化を通じて間接的に、また光分解を通じて直接的に分解に影響を与えている。

### **(3)紫外線や気候変化による植物への影響の例**

過去数十年来、温度と UV-B 放射が著しく増大している高緯度地域では植物の進化が環境の変化に追いついていない可能性がある。南極大陸及び南米南端では、比較的低レベルの UV-B 放射の環境に適応している植物が、オゾン層破壊による UV-B 放射レベルの上昇によって影響を受けている。現在、南半球におけるオゾンによって引き起こされる地域気候の変化は、南極のコケ類や他の植物群落と同様に、南アメリカのアルティプラーノの独特な高地森林帯で生息する多くの種の生息地と生存を脅かしている。UV-B 放射の植物の成長に対するマイナスの影響は通常の場合比較的小さいが、影響の大きい種もある。時間の経過とともに、種間のこれらの相違は陸域生態系の変化をもたらすであろう。特に UV-B 放射が今後数十年にわたり高いままの南極などの地域ではその可能性がある。

## 参考資料6. 紫外線による水圏生態系への影響

### (1) 紫外線による水圏生態系の生産性低下

紫外線の中でも、UV-B が水圏生態系に対してその生産性の低下と生殖機能障害及び発育障害に最も影響を与えていることが、近年までの数多くの生物群や種において明らかとなってきた。その対象生物にはバクテリアから植物プランクトン、大型藻類、従属鞭毛生物、微小動物プランクトン、動物プランクトン、甲殻類の幼生、さらに稚魚まで含まれる。

生物生産の低下は、食物連鎖のすべての段階へと影響することになり、種の構成及び生態系の構造や機能に変化を起こす可能性がある。また、基礎生産量の低下は CO<sub>2</sub> の海洋への吸収容量の減少をもたらす可能性がある。

水圏生態系への紫外線の影響は波長に強く依存する。波長ごとに重み付けした紫外線的作用を表す係数（作用スペクトル）は、波長とともに UV-B 領域から UV-A 領域へと指数関数的に減少する（Neale と Kieber, 2000）。作用スペクトルは対象とする生物群や種や発生段階によって異なり、生態系における栄養段階が低いほど、紫外線の長波長域まで及び、その傾斜は緩やかになる。

### (2) 紫外線に対する水圏生態系の対応メカニズム

水圏生態系のバクテリアや植物プランクトンを含む藻類も、陸域生態系の植物と同様に、紫外線吸収物質（マイコスポリン様アミノ酸）を細胞内に産出することができる。現在までに水圏生態系では 20 種類の紫外線吸収物質が報告されている。ハームフル・アルガル・ブルーム (HABs) \*としてよく知られている渦鞭毛藻は紫外線吸収物質を他の藻類より多く含んでおり、紫外線が増加すると、細胞内に紫外線吸収物質を蓄積させて自ら細胞を防御する。ただし、そのサンスクリーンとしての役割を実験的に証明した例は限られているのが現状である。

### (3) UV-B の影響と鉛直混合の関係性

水圏生態系における特徴的な現象として、UV-B の影響をよく受ける遊泳力のない生物が、水の鉛直混合に身を任せて水中に生息していることが挙げられる。湖沼や海洋のメソコスム（大型の擬似海洋環境実験水槽）の実験によると、水中での UV-B、UV-A、及び光合成有効放射（PAR）\*\*の透過は異なり、UV-B は最も浅い層までしか透過しないことが明らかにされている。温帯域の夏季によく見られる水温躍層 \*\*\*上にある表層混合層（0～6m）内では水が鉛直混合するため、植物プランクトンは PAR を吸収して光合成を行うが、表層（0～1.8m）では UV-B の影響を受ける。この影響の大きさは水の鉛直混合の速度に依存する。

\* ハームフル・アルガル・ブルームとは、人類にとって有害な植物プランクトンを含む藻類一般を意味し、Harmful Algal Blooms(HABs)のことである。従来は赤潮生物と呼ばれていた。

\*\* 光合成有効放射（PAR）とは、400 から 700nm の波長の可視光をさし、Photosynthetically Active Radiation の略である。また、PhAR ともいう。

\*\*\* 水温躍層とは、表層で水温が急激に変化する層のことをさし、その上層と下層では水の混合は起こりにくい。

UV-B 照射量の増加によって、群集構造が基礎生産者から細菌へと遷移する可能性があり、この変化は海洋の表層水での CO<sub>2</sub> 濃度に影響を与える可能性が大きい。現在、鉛直混合を考慮した UV-B の影響を評価するモデルも提唱されている。

#### **(4) 有色溶存有機物と UV-B の相互の影響**

植物プランクトンを含む藻類を動物が摂取した際に食べ残しのバクテリアによる分解による水中に溶出して発生する有色溶存有機物 (CDOM) は、UV-B の水中での透過率を減少させ、UV-B の影響を軽減する。これによって、水中の基礎生産量が増加し、したがって CDOM の増加に寄与する。一方、バクテリアは CDOM の分解にも深く関わりあっている。また、UV-B によって CDOM は分解されるので、基礎生産量が UV-B の影響をより多く受けるので減少する。このように、CDOM は地球規模での炭素循環においても一定の役割を果たす。

#### **(5) 南極海域での海洋生物への紫外線の影響**

植物プランクトンによる 1 日当たりの 1m<sup>2</sup> の水柱当たりの基礎生産量は、UV の水中透過特性によって深度により波長が変わることにより、またオゾン全量によっても変化すると予測されている。植物プランクトンが生息している表層水の混合深度と混合速度を考慮すると、水柱当たりの基礎生産量はさらに 1.5~3.5% 減少する。重み付けした生物作用スペクトル、混合深度及び混合速度の組み合わせによっては、オゾン全量の減少による紫外線の影響により、水柱当たりの植物プランクトンの基礎生産量は南極海で最大 8.5% 減少すると予測されている (Neale と Kieber, 2000)。

## 参考資料7. 紫外線による材料の損傷

### (1) 紫外線等による材料劣化

オゾン層破壊に伴う有害紫外線の増加と気候変化との相互作用によって、世界遺産や文化財に何らかの損傷がもたらされることが危惧されている。様々な天然材料（木材、羊毛等）や人工合成材（プラスチック等）は、UV-Bにより光劣化が起これ、変色や強度の低下などの損傷が促進される。そのため、UV-B照射量が増加すると劣化が速まり、特に気温が高く日射量が多い熱帯地域では材料の劣化が著しく、深刻な事態が予測される。

表3-資-1に屋外での材料劣化に影響を与える環境要素を示したが、気候変化は天然材料と人工合成材の紫外線に起因する劣化の速さを変化させる可能性がある（UNEP-EEAP, 2010）。劣化の速さは、高温、高湿、大気汚染物質の存在によって加速される。

表3-資-1 屋外の材料劣化に影響を与える各種要因の効果

	UV-B	温度	湿度	大気汚染物質
プラスチック	非常に強い	強い	弱い	弱い
木	強い	中程度	非常に強い	弱い

※「非常に強い」「強い」「中程度」「弱い」の4段階で評価している。

### (2) 材料の紫外線対策

太陽紫外線による材料損傷を抑制するために、光安定剤や表面塗装剤が広く用いられる。近年、紫外線への耐性が向上した新種のプラスチック製品や紫外線による損傷を抑制する添加剤（紫外線吸収剤、光安定剤）などの開発が進んでいる。最近の触媒の進歩により発見されたメタロセンプラスチック（ポリエチレンとポリプロピレン）は、紫外線への耐性などの特性が向上した（UNEP-EEAP, 2003）。その他、従来の高分子光安定剤（HALS）2つ以上を混合してプラスチックに使われた時に、相乗的な効果があることがわかっている。光安定剤の効果の向上は、紫外線と気候変化による影響に対するプラスチック配合物の安定化にかかるコストを最小化させるために重要である（UNEP-EEAP, 2003）。さらに最近では、従来使われてきた添加剤と比べて粒子径が一桁又はそれ以上小さいナノスケール添加剤の開発が進められていることから、添加剤としての効果、さらに光安定剤としての効果についての評価が重要となっている（UNEP-EEAP, 2007）。

## 参考資料8. オゾン層破壊と大気質への影響

オゾン層破壊が大気質や対流圏大気組成に及ぼす影響についての最近の研究成果に関して、UNEPの環境影響評価パネル報告書（UNEP-EEAP, 2014）に総括されている。

### （1）オゾン層破壊物質の代替物質の影響評価

成層圏オゾン層の破壊は、人為的に放出されるオゾン層破壊物質（ODS）の増加によって引き起こされた。これまでオゾン層の保護を目的として、ODSの生産や使用、ならびに放出に対する規制が進められる。ODSとして規制対象となっている物質は分子内に塩素や臭素元素を含む長寿命有機化合物である。

ODSに対する規制が進む中、ODSの代替となる様々な候補物質の開発も進められてきた。代替物質の中には、分子内に、フッ素、塩素、臭素と言ったハロゲン原子を組んだ有機物が含まれている。また、人為起源以外にも生物活動によってもハロゲン原子を含んだ有機物が大気に放出されている。更に、領域によっては、活性ハロゲン化学種が対流圏大気における重要な酸化剤としての役割を果たしたことも知られている。

### 臭素化メタン類

ブロモホルム（ $\text{CHBr}_3$ ）やジブロモメタン（ $\text{CH}_2\text{Br}_2$ ）は海洋からも大気に放出されているが、その放出量の推定精度は向上している。大気に放出されたブロモメタン類の光酸化反応による臭素原子の放出に伴う地表レベルのオゾンの破壊も地域によっては観測されている。熱帯域はブロモメタン類の放出強度が高い地域であると同時に鉛直輸送も活発な地域である。ブロモメタン類の光化学的な大気寿命は1~3週間程度と短寿命であるが、それにも関わらず、熱帯域で放出されたブロモメタン類の90%以上が成層圏に輸送されると見積もられている。

### 1-ブロモプロパン

1-ブロモプロパン（ $n\text{-C}_3\text{H}_7\text{Br}$ ）は、殺虫、薬剤、第四級アンモニウム化合物合成に使用されているほか、ODSであるCFC-113やメチルクロロホルムの代替物質として金属や電子部品の洗浄剤、接着剤の噴霧剤などの用途で用いられてきた。アメリカ環境保護庁（USEPA）の新規代替物質に関する政策（SNAP）では、工業用機器のための代替洗浄剤としての用途のみに対して使用承認を行っている。しかしながら、実験動物を用いた毒性試験から、発がん性を始めとした毒性が認められている。

### 一酸化臭素

一酸化臭素（ $\text{BrO}$ ）は南半球の清浄海洋大気においてジメチルスルフィド（DMS）の主要な酸化開始剤の一つとして働いていると考えられている。DMSの大気酸化は海洋大気における主要なエアロゾル生成源であり、雲形成や光散乱に寄与することで、気候にも影響を及ぼす。一酸化臭素の主な生成源は海塩粒子と考えられている。

## 塩化メタン類

四塩化炭素は ODS の一つとして規制対象になっている物質であるが、大気中の四塩化炭素濃度の減少は削減スケジュールからの予想よりも緩やかであることから、確認されていない発生源が存在する可能性がある。

クロロホルムの発生源については、人為発生源、自然発生源とも今なお、不確かな部分がある。充分には認識されていない主要な自然発生源の一つの候補として泥炭沼地が考えられている。泥炭沼地の様な発生源は今後の気候変化や土地利用の変化によって、その発生量は影響されるため、今後の推定に不確実さをもたらす可能性がある。

## HCFO 1233zd(E)

ヒドロクロロフルオロカーボン (HCFC) は CFC の代替物質として初めに検討された物質であるが、OH ラジカル反応による大気寿命が必ずしも充分には短くなく、成層圏への塩素原子の供給源となり得る可能性があることから、現在では規制対象となっている。

これに対し、trans-1-クロロ-3,3,3-トリフルオロプロペン (HCFO 1233zd(E)) は発泡剤、冷媒、ならびに溶媒の用途で代替物質として最近開発された物質である。一連の毒性試験でも低い毒性レベルを示している。なお、HCFO (ヒドロクロロフルオロオレフィン) は HCFC の一種だが、C=C 二重結合を有しており大気寿命が通常の HFC に比べても著しく短いため、ODP 値は極めて小さい。それ故、C=C 二重結合を有している (オレフィン: アルケン系化合物) ことを明示し、HCFC と区別するために HCFO と表記されている。

## フッ化スルフリル

規制対象となっている臭化メチルの代替物質として燻蒸剤として用いられており、今後使用が拡大することも予想される。フッ化スルフリル (SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) の大気中での酸化反応による寿命は長く (>300 年)、主要な除去過程は雲水への溶け込みと降水過程と考えられる (想定される寿命は数週間)。最終的には海水中で、無機硫黄とフッ素への分解と考えられており、分解生成物による環境影響も特段の懸念は示されていない。なお、フッ化スルフリルは大きな温暖化ポテンシャル (GWP 値) を有していることが報告されている。

## ヨウ化パーフルオロブチル

1-ヨウ化パーフルオロブチル (n-C<sub>4</sub>F<sub>9</sub>I) は、航空機の代替クリーナー、宇宙産業での酸素システムの洗浄剤などの用途での CFC-113 の代替物質の候補の一つである。大気中では光分解が主要な消失過程と考えられ、その寿命は数時間程度と推定されており、ODP ならびに GWP も非常に小さい。

## ヒドロフルオロオレフィン

ヒドロフルオロオレフィン (HFO) は、HCFO (ヒドロクロロフルオロオレフィン) と同様、HFC (ヒドロフロロカーボン) の中でも C=C 二重結合を有するアルケン系化合物の総称として用いられている。HFO1234ze と HFO1234yf は冷媒、発泡剤、エアロゾル噴霧剤

等の用途での代替物質として開発された物質である。HFO1234ze に関しては、急性毒性や遺伝毒性試験では、低い毒性を示している。また大気寿命も短く、GWP も小さい。

## (2) オゾン層破壊に伴う大気質と対流圏大気組成に対する影響

### OH ラジカル

メタン、HCFC、HFC などの温室効果ガスの大気寿命は OH ラジカルとの反応に大きく依存する。また OH ラジカルの関与する化学過程は光化学オゾンやエアロゾルの生成に大きく影響している。よって、OH ラジカル濃度やその長期的な変化を理解し、今後の変化を予測することがオゾン層破壊の大気質への影響を評価する上で大切である。

OH ラジカルは反応性が高く、その大気中濃度は極めて低く、また環境条件の変化に極めて敏感に応答するため、OH ラジカルの直接計測は容易ではない。一方、大気質を評価する上で、OH ラジカルの挙動を理解することは重要であり、OH ラジカルの濃度変化や反応性を直接追跡することが大気光化学モデルの妥当性評価の点でも大切である。最近の OH ラジカルの直接計測法の進展や応用例の増大に加え、相互検証実験なども進み、直接計測法を利用した観測も増えてきた。その結果、OH 濃度とオゾンの光分解速度 ( $J(O_3)$ ) との間に直線関係が存在\*することが最近の OH 直接計測法を用いた観測からも確かめられた。 $J(O_3)$  がオゾン全量に依存することから、オゾン全量が 1%減少するごとに  $J(O_3)$  は約 1.5%増加すると予想される。

光化学的に生成した OH ラジカルは、大気中での微量成分との反応で消失するが、その一部は大気中での光化学反応において再生される。都市域やいくつかの森林地帯で行われた OH ラジカルの直接計測では、観測された OH ラジカル濃度と数値モデルから予測される濃度との間に比較的良い一致が認められている。一方で、イソプレン (2-メチル-1,3-ブタジエン) などの植物起源炭化水素濃度が高く NO<sub>x</sub> 濃度が低い地域では、実測された OH ラジカル濃度が数値モデルから予想される濃度と比べてはるかに高い、という現象が観測されている。この事は、低 NO<sub>x</sub> 条件下でのイソプレンなどの植物起源炭化水素の OH 酸化反応系の反応機構が充分には理解できていない可能性を示唆している。また最近では、OH ラジカルの反応性を直接計測する手法も開発され、色々な環境下での OH 反応性の観測が行われた結果、いくつかの観測では、実測された OH 反応性は計測される反応性ガス濃度から予想される反応性に比べて大きくなる現象が見い出されており、OH ラジカルの消失に関与する未計測の物質の存在が指摘されている。

OH ラジカルの全球的な濃度は大気中の微量成分 (例: メチルクロロホルム) をトレーサーとして用いて見積もられている。OH ラジカルの平均濃度やその長期的トレンドについては、観測データからの見積もりや数値モデルによる推定のいずれにおいても今なお、不確実性が残されている。CO や NO<sub>x</sub> の発生量の不確かさや光化学過程のメカニズムの理解の不十分さが原因と思われる。この様な不確実性は存在するものの、数値モデルによる将来の

---

\* OH ラジカルの主要な生成源がオゾンの光分解によって生成する励起酸素原子と水蒸気との反応であることから、OH ラジカル濃度と  $J(O_3)$  との間には直線関係の存在が期待される。

OH ラジカル濃度の変化を推定した結果、OH 濃度は CH<sub>4</sub>、CO、NO<sub>x</sub> などの今後の放出量に大きく依存し、北半球と南半球で将来の OH 濃度分布が非対称になる可能性があることが指摘されている。更に、微量気体の放出量に変化がない条件では、成層圏オゾンが 1980 年レベルに回復すると OH の全球平均濃度は 1.7%減少するとのモデル予測もある。

## オゾン

対流圏のオゾンは都市から地球規模のいずれのスケールにおいても注目すべき最も重要な大気汚染物質の一つである。対流圏におけるオゾンの供給源は成層圏からのオゾン流入と対流圏での光化学的なオゾン生成である。特に後者の光化学的なオゾン生成では、VOC と NO<sub>x</sub> が関与するため、今後の対流圏オゾンの変化には、これらの汚染物質の種類やその放出量の変化が重要な因子である。さらに、太陽紫外線も対流圏オゾン量の変化に影響を及ぼす因子の一つである。

都市レベルでの地表オゾン濃度のトレンドは都市ごとに異なっているが、ヨーロッパや北アメリカの都市では減少傾向が、一方アジアの都市では増加傾向が報告されている。地域スケールで見ると、バックグラウンドオゾンは多くの地域で増加傾向が認められている。それぞれの地域でのオゾン濃度は、観測を行っている近傍での光化学オゾン生成のみならず、遠隔地域で生成されたオゾンの長距離輸送にも依存するため、オゾン前駆体の放出量が増大している地域の影響が半球規模でのオゾン濃度のトレンドに現れる可能性もある。一方、オゾンゾンデ観測データや清浄地域での地表オゾンのモニタリングデータの解析からは、過去 20~40 年間のオゾンの増加はその初期に顕著に認められ、逆に近年は明瞭な増加傾向が殆ど認められないとの報告もある。

対流圏のオゾン濃度は、対流圏での光化学的なオゾン生成以外に、成層圏からのオゾンの流入によっても影響を受ける。成層圏オゾンの変化は、紫外線量に影響を及ぼすだけでなく、成層圏から対流圏へのオゾンの流入量にも影響を及ぼす。今後の温室効果ガスの増加と成層圏オゾンの回復は大気の循環を加速し、成層圏から対流圏へのオゾンの輸送量を増加させる方向に働くものと予想される。

最近の全球化学輸送モデル実験から、今後のオゾン層の回復に伴う太陽紫外線の減少は地表オゾンを増加させる方向に作用し、特にその影響は高緯度ほど大きいとの報告もある。しかしその一方で、オゾン層の回復に伴う紫外線量の変化が直接オゾン濃度に及ぼす影響は限定的であるとする報告も有り、紫外線量の変化の影響評価には大きな不確実性がある。

## エアロゾル

対流圏エアロゾルは人の健康や生態系への影響だけでなく、エアロゾルによる太陽光の散乱や吸収並びに雲核として働きを通して、直接・間接的に放射強制力に影響を及ぼす。オゾン層破壊は、特に大気中での化学反応によって二次的に生成されるエアロゾル（硫酸塩、硝酸塩、有機物等を含むエアロゾル）に影響を及ぼす可能性があると考えられる。二次エアロゾルの中でも有機物質で構成されるエアロゾル（有機エアロゾル）については、その生成機構やエアロゾルの消失過程を十分に把握できているとは言えず、未だに数値モデル

[<<最初のページへ戻る](#)

は実測のエアロゾル量を過少評価する傾向にある。

紫外線は二次エアロゾルの生成に重要であると共に、その消失にも何らかの役割を果たしていると思われる。しかしながら、紫外線の変化が二次エアロゾルの収支に如何に影響するかは十分には評価されていない。

将来のエアロゾル濃度の変化に関しては、ブラックカーボンや有機エアロゾルは、今後数十年間は引き続き濃度が増加し、その後減少傾向に移ると予想されているが、その時期や程度は他の汚染物質の放出量を含めたシナリオに強く依存する。また気候変化がエアロゾルに及ぼす影響評価についても極めて大きな不確かさが存在している。気候変化は気温や水蒸気量の変化、植物活動の変化に伴うエアロゾル前駆体の放出量の変化などを介してエアロゾルの生成速度に影響する。更には山火事の発生頻度・強度の変化もエアロゾル量に大きな影響を及ぼす。一方、エアロゾルの光学特性、吸湿特性、雲核生成特性は放射強制力に影響を及ぼす。またこれらのエアロゾルの物理・化学特性はエアロゾルの生成、成長、ならびにエージング過程に依存する。この様な複雑なフィードバックの存在が、気候変化がエアロゾルに及ぼす影響の評価を難しくしている。

## 第4部 巻末資料

### 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 <sub>3</sub>	52	1	1	4,750
		CFC-12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	102	1	0.81	10,900
		CFC-113	C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	93	0.8	0.82	6,130
		CFC-114	C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	189	1	0.50	10,000
		CFC-115	C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> Cl	540	0.6	0.26	7,370
	グループII (ハロン)	ハロン-1211	CF <sub>2</sub> BrCl	16	3	7.7	1,890
ハロン-1301		CF <sub>3</sub> Br	72	10	19.0	7,140	
ハロン-2402		C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Br <sub>2</sub>	28	6	15.7	1,640	
附属書B	グループI (その他のCFC)	CFC-13	CF <sub>3</sub> Cl	640	1	1.0	14,400
		CFC-111	C <sub>2</sub> FCl <sub>5</sub>	—	1	—	—
		CFC-112 等10物質	C <sub>2</sub> F <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	63.6	1	-0.98	—
グループII	四塩化炭素	CCl <sub>4</sub>	32	1.1	0.89	1,400	
グループIII	1,1,1-トリクロロエタン	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	5	0.1	0.17	146	
附属書C	グループI (ハイドロクロフルオロカーボン)	HCFC-21	CHFCl <sub>2</sub>	1.7	0.04	0.036	—
		HCFC-22	CHF <sub>2</sub> Cl	11.9	0.055	0.034	1,810
		HCFC-123	C <sub>2</sub> HF <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>	1.3	0.02-0.06	0.01	77
		HCFC-124	C <sub>2</sub> HF <sub>4</sub> Cl	5.9	0.02-0.04	0.022	609
		HCFC-133	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl	3.1	0.02-0.06	0.017	—
		HCFC-141b	CH <sub>3</sub> CFCl <sub>2</sub>	9.4	0.11	0.102	725
		HCFC-142b	CH <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> Cl	18	0.065	0.057	2,310
		HCFC-225ca	CF <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CHCl <sub>2</sub>	1.9	0.025	0.025	122
		HCFC-225cb 等40物質	CF <sub>2</sub> ClCF <sub>2</sub> CHClF	5.9	0.033	0.033	595
		他					
グループII (ハイドロプロモフルオロカーボン)	HBFC-22B1 等34物質	CHF <sub>2</sub> Br	—	0.74 他	—	—	
	グループIII	プロモクロロメタン	CH <sub>2</sub> BrCl	—	0.12	—	—
附属書E	臭化メチル	CH <sub>3</sub> Br	0.8	0.6	0.57	5	
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CO<sub>2</sub>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\*

	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 <sub>3</sub>	228	0	14,800
	HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	5.4	0	675
	HFC-41	CH <sub>3</sub> F	2.8	0	92
	HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	30	0	3,500
	HFC-134	CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	10	0	1,100
	HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	14	0	1,430
	HFC-143	CH <sub>2</sub> FCHF <sub>2</sub>	3.6	0	353
	HFC-143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	51	0	4,470
	HFC-152	CH <sub>2</sub> FCH <sub>2</sub> F	—	0	53
	HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	1.6	0	124
	HFC-161	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	—	0	12
	HFC-227ea	CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	36	0	3,220
	HFC-236fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	213	0	9,810
	HFC-236ea	CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	11.4	0	1,370
	HFC-236cb	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	—	0	1,340
	HFC-245ca	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	6.6	0	693
	HFC-245fa	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7.9	0	1,030
	HFC-365mfc	CH <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	—	0	794
	HFC-43-10mee	CHFCH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	17.0	0	1,640
パーフルオロカー ボン (PFC)	PFC-14	CF <sub>4</sub>	>50,000	0	7,390
	PFC-116	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	>10,000	0	12,200
	PFC-218	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	2,600	0	8,830
	PFC-c318	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	3,200	0	10,300
	PFC-31-10	C <sub>7</sub> F <sub>10</sub>	2,600	0	8,860
	PFC-41-12	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	4,100	0	9,160
	PFC-51-14	C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	3,100	0	9,300
	パーフルオロシク ロプロパン	c-C <sub>3</sub> F <sub>6</sub>	—	0	17,340
	PFC-91-18 等	C <sub>10</sub> F <sub>18</sub>	—	0	>7,500
六フッ化硫黄	六フッ化硫黄	SF <sub>6</sub>	3,200	0	22,800
三フッ化窒素	三フッ化窒素	NF <sub>3</sub>	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SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>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. 国際的なオゾン層保護対策

### (1) オゾン層保護のためのウィーン条約

オゾン層保護のためのウィーン条約は、オゾン層保護のための国際的な枠組を定めた条約であり、1985年に採択された。我が国は1988年9月30日に加入。2015年11月現在で締約国数は197カ国及びEUであり、全ての国連加盟国によって批准された。

本条約においては、締約国が、

- ・ オゾン層の変化により生ずる悪影響から人の健康及び環境を保護するために適当な措置をとること（第2条第1項）
- ・ 研究及び組織的観測等に協力すること（第3条）
- ・ 法律、科学、技術等に関する情報を交換すること（第4条）

等について規定している。

### (2) オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書

オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書は、ウィーン条約に基づきオゾン層破壊物質の削減スケジュール等の具体的な規制措置等を定めた議定書であり、1987年に採択された。モントリオール議定書の採択後、オゾン層の破壊が予想以上に進んでいることが判明したこと等から、以後、1990年（ロンドン改正）、1992年（コペンハーゲン改正）、1995年（ウィーン調整）、1997年（モントリオール改正）、1999年（北京改正）及び2007年（モントリオール調整）及び2016年（キガリ改正）の7回にわたって改正・調整された。

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-資-1に示す。

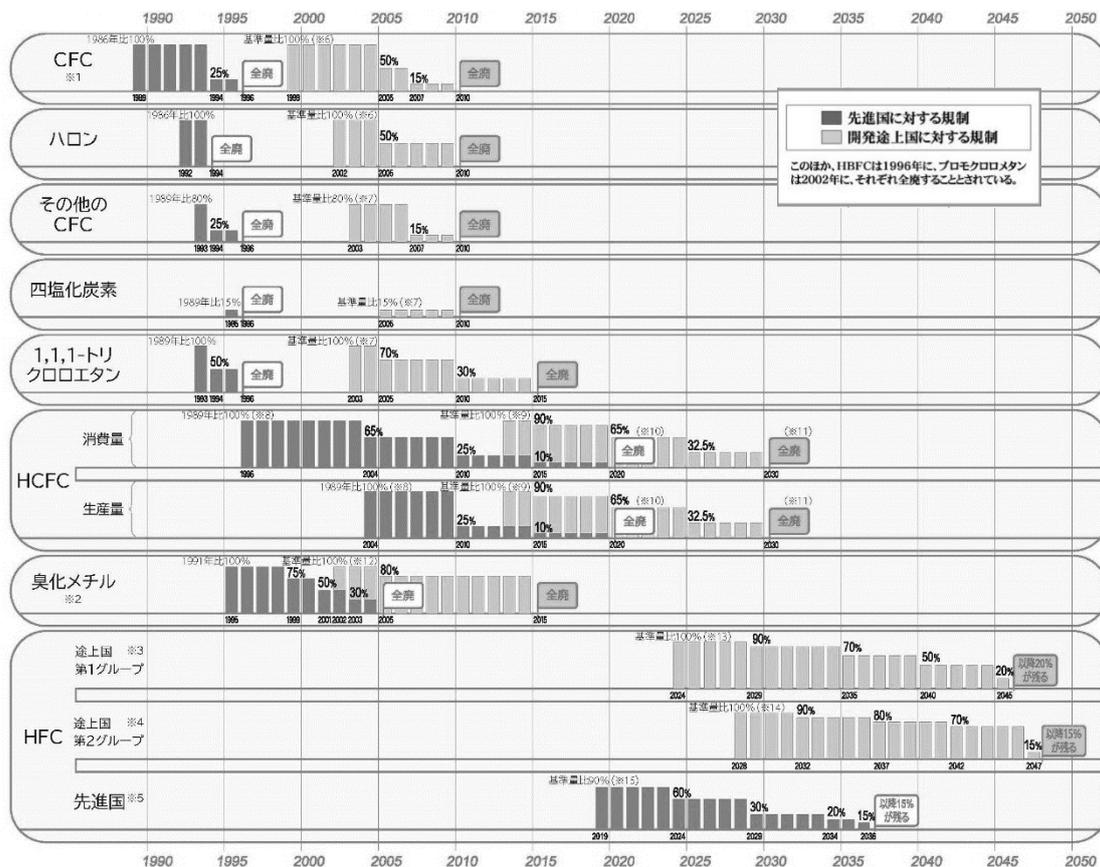


図4-資-1 モントリオール議定書に基づく段階的削減スケジュール

各物質のグループ毎に、生産量及び消費量（＝生産量＋輸入量－輸出量）が削減される。

- ※1) 附属書G Aグループ 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% (CO<sub>2</sub>換算値<sup>4)</sup>)。
- ※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% (CO<sub>2</sub>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% (CO<sub>2</sub>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。

<sup>4</sup> CO<sub>2</sub>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

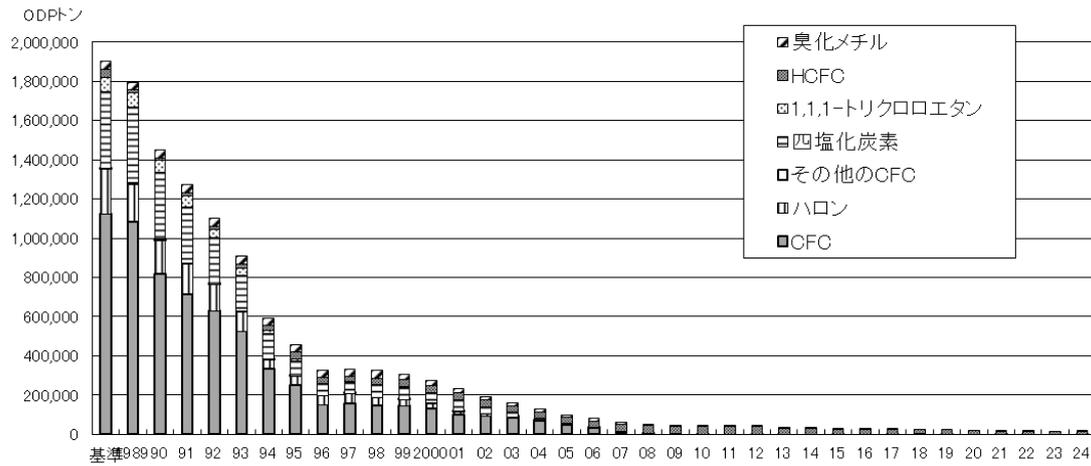


図4-資-2 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の生産量の推移（1989～2024年）  
 ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完（HCFCを除く）し、基準年と規制開始の間  
 の空白データは一定の割合で変化するものとして補完（先進国のHCFCについては1990年・1991年のデ  
 ータを補完）。単位はODPトン。（出典）UNEP オゾン事務局ウェブサイト

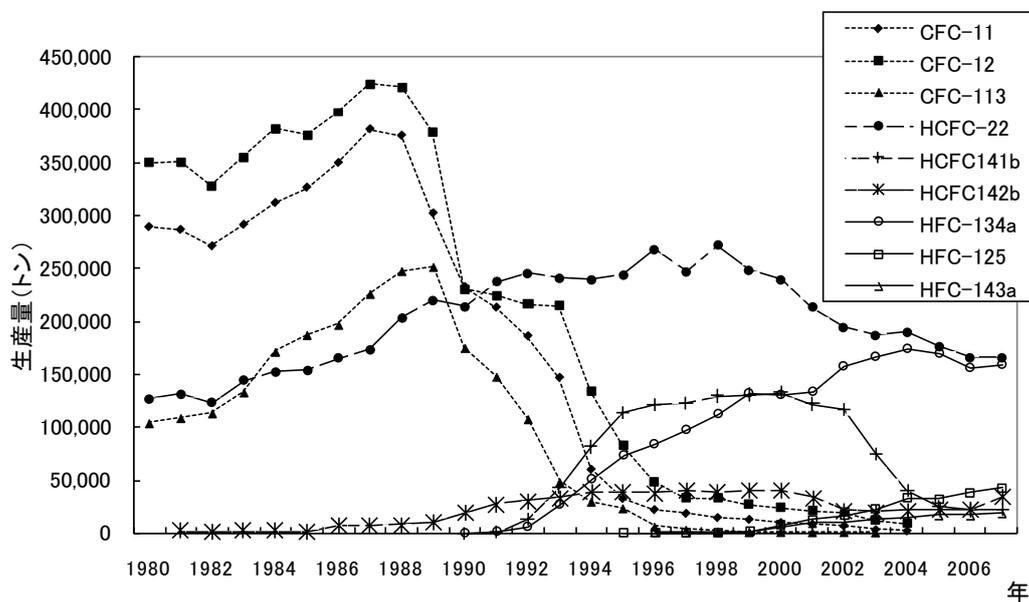


図4-資-3 主要なフロン年の別生産量の推移（1980～2007年）  
 集計はAFEASに登録のあったデータのみ。単位は重量トン。  
 （出典）The Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS) ウェブサイト

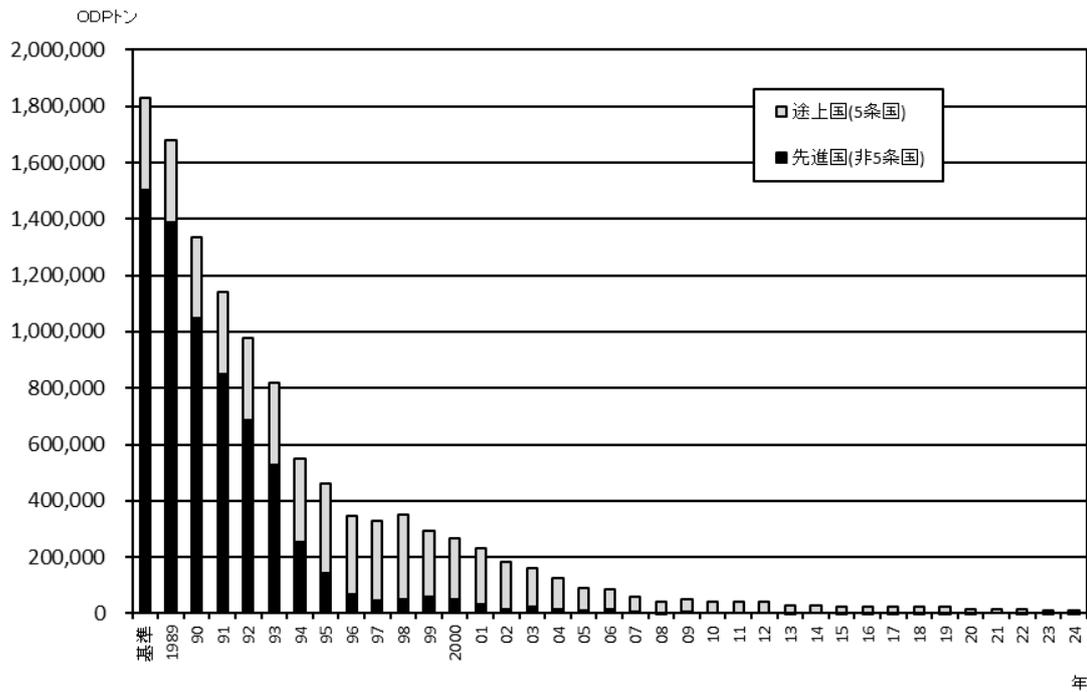


図 4-資-4 モントリオール議定書に基づくオゾン層破壊物質の消費量の推移 (1989～2024 年)  
 ただし、基準年以前の空白データは基準年で一定として補完 (HCFC を除く) し、基準年と規制開始の間の空白データは一定の割合で変化するものとして補完 (先進国の HCFC については 1990 年・1991 年のデータを補完)。単位は ODP トン。(出典) UNEP オゾン事務局ウェブサイト

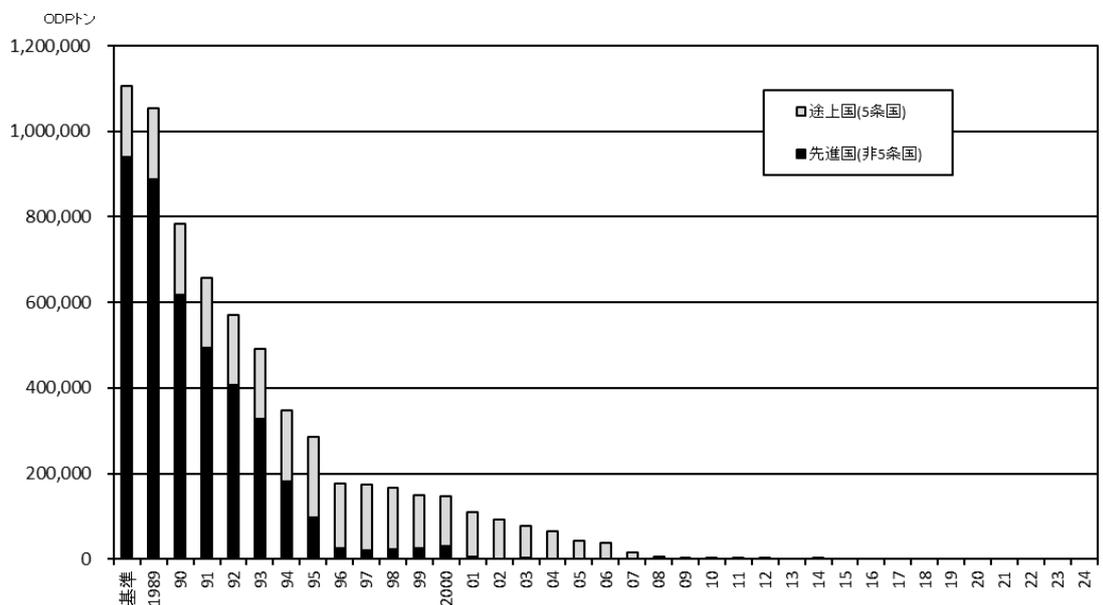


図 4-資-5 モントリオール議定書に基づく CFC (附属書 A グループ I) の消費量の推移 (1989～2024 年)

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

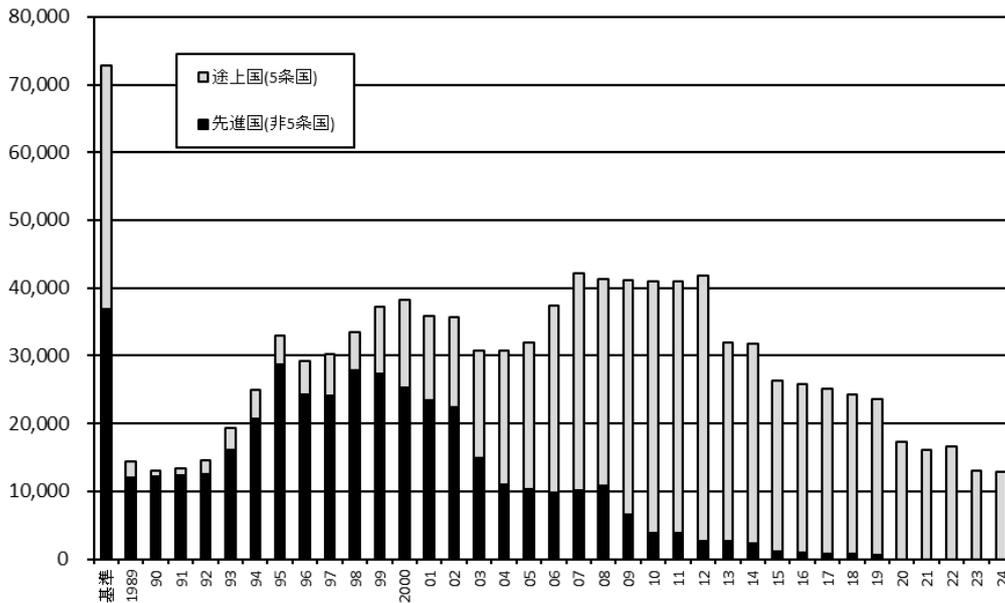


図4-資-6 モントリオール議定書に基づくHCFCの消費量の推移（1989～2024年）

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

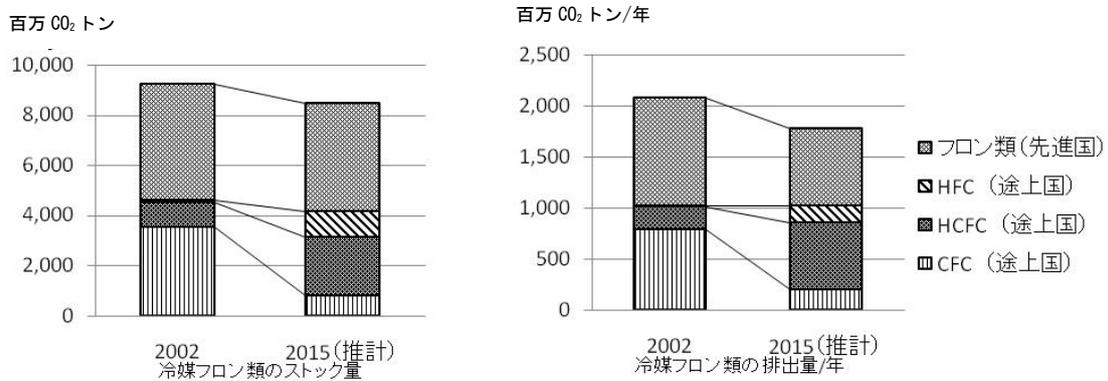


図4-資-7 冷媒フロン類のストック量及び排出量/年（2002年・2015年（推計））

単位はCO<sub>2</sub>換算トン。（出典）IPCC/TEAP 特別報告

### 1-3. 我が国におけるオゾン層保護対策

#### (1) 特定物質の生産・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調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-資-1 特定物質代替物質の生産量・消費量（議定書附属書F）

（単位：GWP千トン）

年次 <sup>(1)</sup>	HFC		HFC-23	
	生産量	消費量	生産量	消費量
2019年	28,654	46,885	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
2023年	19,878	28,771	4,766	116
2024年	14,836	25,153	978	-1,336

(1) 各年は1月から12月までの値となっている。

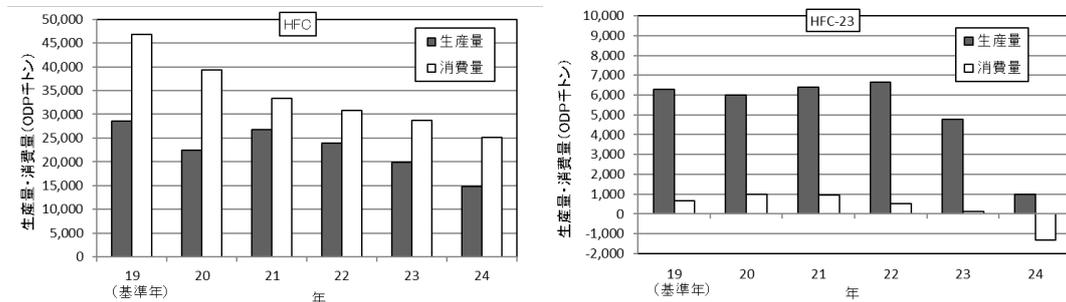


図4-資-8 特定物質代替物質の生産量・消費量（議定書附属書F）

（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-資-2 冷媒フロン類を回収した機器の台数

(単位：千台)

機 器	フロン類の種類	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
業務用 冷凍空調機器	CFC	57	53	57	50	47	42	45	43	36	37
	HCFC	387	503	454	427	403	376	368	342	303	278
	HFC	734	982	1,015	1,045	1,102	1,325	1,098	1,169	1,260	1,409
	計	1,178	1,538	1,526	1,522	1,552	1,743	1,511	1,553	1,599	1,724
家庭用エアコン		2,225	2,355	2,567	2,833	3,398	3,581	3,854	3,540	3,694	3,666
家庭用 冷蔵庫冷凍庫		2,775	2,799	2,829	2,982	3,354	3,597	3,709	3,543	3,520	3,338
カーエアコン		2,904	2,741	2,702	2,972	2,967	2,935	2,779	2,678	2,392	2,389
合 計		9,082	9,433	9,624	10,309	11,269	11,856	11,853	11,315	11,204	11,117

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-資-3 冷媒フロン類の回収量

(単位：トン)

機 器	フロン類の種類	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
業務用 冷凍空調機器	CFC	150	165	166	119	131	110	124	89	94	88
	HCFC	2,847	3,169	3,119	2,839	2,772	2,564	2,408	2,218	1,908	1,723
	HFC	1,427	1,507	1,813	2,137	2,312	2,565	2,702	2,836	3,421	3,620
	計	4,424	4,841	5,097	5,094	5,215	5,239	5,235	5,143	5,423	5,431
家庭用 エアコン	HCFC	1069	934	920	940	1,035	951	878	697	638	540
	HFC	508	570	700	892	1,181	1,367	1,584	1,609	1,774	1,953
	計	1,577	1,505	1,622	1,835	2,226	2,346	2,505	2,380	2,542	2,493
家庭用 冷蔵庫冷凍庫	CFC	72	58	50	44	45	41	36	31	28	24
	HCFC	10	8	7	7	6	6	5	4	4	3
	HFC	166	144	138	132	136	132	120	106	99	84
	計	248	210	195	183	188	172	161	142	132	112
カーエアコン	CFC	14	10	6	5	4	3	2	2	1	1
	HFC	773	710	682	720	718	694	625	579	501	489
	計	787	720	689	726	722	696	627	581	502	490
特定 フロン	CFC	236	233	222	168	180	153	163	122	123	114
	HCFC	3,926	4,111	4,046	3,786	3,813	3,521	3,291	2,919	2,550	2,265
	小計	4,162	4,334	4,267	3,954	3,993	3,675	3,454	3,041	2,674	2,379
代替 フロン	HFC	2,874	2,931	3,333	3,881	4,347	4,758	5,031	5,130	5,795	6,145
合計		7,036	7,275	7,601	7,835	8,340	8,433	8,485	8,171	8,469	8,525

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-資-4 冷媒フロン類の破壊量

(単位：トン)

機 器	フロン類の種類	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
業務用 冷凍空調 機器 カーエアコン	CFC	155	190	150	123	116	93	85	97	77	82
	HCFC	2,305	2,464	2,363	2,037	1,786	1,538	1,493	1,525	1,305	1,176
	HFC	2,034	2,161	2,268	2,378	2,457	2,476	2,516	2,845	2,751	2,853
	その他	—	—	—	—	—	—	—	—	17	6
	計	4,494	4,815	4,781	4,538	4,357	4,108	4,099	4,484	4,145	4,117
家庭用 エアコン	HCFC	716	245	239	195	189	121	46	45	53	46
	HFC	325	142	179	183	218	197	185	126	138	103
	計	1,041	388	420	382	413	336	259	197	226	149
家庭用 冷蔵冷凍 庫	CFC	71	56	49	43	44	40	36	30	27	23
	HCFC	10	7	6	6	5	4	3	3	3	2
	HFC	108	40	49	38	34	35	29	24	19	16
	計	189	103	104	87	83	79	69	57	49	42
特定 フロン	CFC	226	246	199	166	160	133	121	127	104	105
	HCFC	3,031	2,716	2,608	2,238	1,980	1,663	1,542	1,573	1,360	1,224
	小計	3,257	2,962	2,807	2,404	2,140	1,796	1,663	1,700	1,465	1,329
代替 フロン	HFC	2,467	2,343	2,496	2,599	2,709	2,708	2,730	2,995	2,907	2,972
	合計	5,724	5,305	5,303	5,003	4,849	4,504	4,393	4,695	4,372	4,302

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。

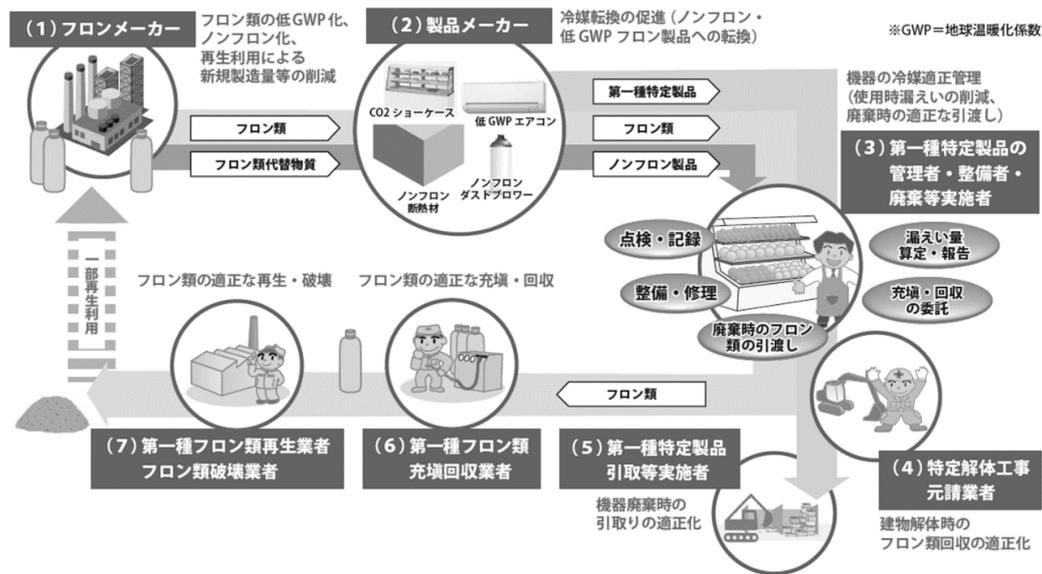


図4-資-9 フロン排出抑制法の概要

### (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-資-5 ハロン使用機器の設置状況（2024年(令和6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	29,654	15,954
	消火装置	7,106	641
	消火器	6,330	109
	小計	43,090	16,704
ハロン-2402	消火設備	236	122
	消火装置	56	8
	消火器	98	2
	小計	390	132
ハロン-1211	消火設備	23	8
	消火装置	4	0
	消火器	507	31
	小計	534	39
合計		44,014	16,875

（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6年度）

表4-資-6 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	2009	89	99
1995	117	56	2010	58	161
1996	126	59	2011	46	159
1997	111	46	2012	41	196
1998	73	94	2013	91	217
1999	57	78	2014	173	179
2000	65	97	2015	192	166
2001	66	104	2016	187	172
2002	63	80	2017	164	236
2003	52	112	2018	173	191
2004	100	118	2019	170	160
2005	123	133	2020	178	187
2006	173	110	2021	130	214
2007	208	145	2022	152	165
2008	156	146	2023	105	146

（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6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-資-7 令和5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 合計	(参考)排出量	(参考)排出量	届出 移動量*****	
		大気	公共用水域	排出量**		(ODPトン)***	(万CO2トン)****		
CFC	CFC-11	288	439	0	684,339	684,778	684.8	325.3	0
	CFC-12	161	5,024	0	354,398	359,422	359.4	391.8	0
	CFC-113	284	0	0	0	0	0.0	0.0	0
	CFC-114	163	-	-	-	-	-	-	-
	CFC-115	126	0	0	0	0	0.0	0.0	0
	CFC-13	107	-	-	-	-	-	-	-
	CFC-112	263	-	-	-	-	-	-	-
	合計		5,463	0	1,038,737	1,044,200	1,044	717	0
ハロン	ハロン1211	380	-	-	0	0	0.0	0.0	-
	ハロン1301	382	1,040	0	8,774	9,814	98.1	7.0	0
	ハロン2402	211	0	0	785	785	4.7	0.1	0
	合計		1,040	0	9,559	10,599	103	7	0
HCFC	HCFC-21	177	93	0	93	186	0.0	0.0	0
	HCFC-22	104	102,707	0	716,393	819,100	45.1	148.3	3,060
	HCFC-123	164	16,981	0	57,884	74,865	1.5	0.6	13,300
	HCFC-124	105	1,000	0	1,000	2,000	0.0	0.1	0
	HCFC-133	106	43,000	0	43,000	86,000	5.2	0.0	2,300
	HCFC-141b	176	127	0	828,730	828,857	91.2	60.1	0
	HCFC-142b	103	10,200	0	296,910	307,110	20.0	70.9	90,000
	HCFC-225	185	22,771	0	22,776	45,547	3.2	1.6	44,504
	合計		196,879	0	1,966,786	2,163,665	166	282	153,164
四塩化炭素	149	1,697	322	2,031	4,050	4.5	0.6	106,206	
1,1,1-トリクロロエタン	279	480	19,067	19,549	39,096	3.9	0.6	1	
臭化メチル	386	95,607	0	501,606	597,213	358.3	0.3	0	
合計		301,166	19,389	3,538,268	3,858,823	1,680	1,007	259,371	

\* 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

\*\*\*\* CO<sub>2</sub>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

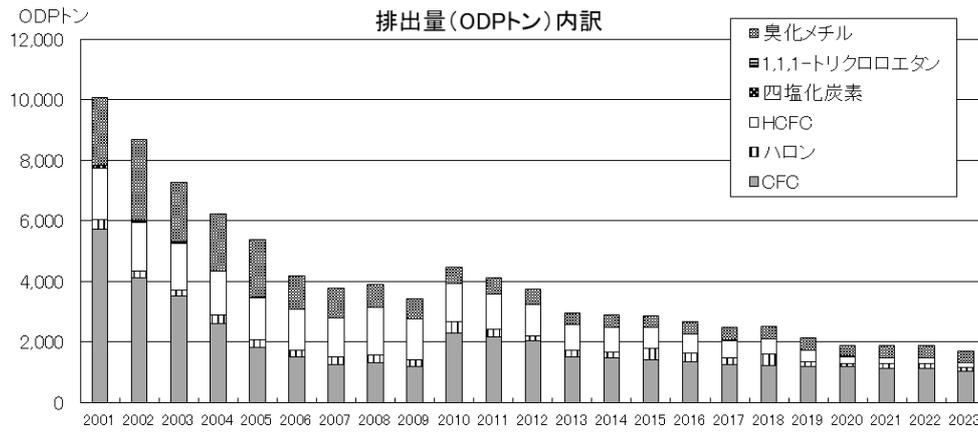


図4-資-10 PRTRに基づくオゾン層破壊物質の排出量(ODP換算)

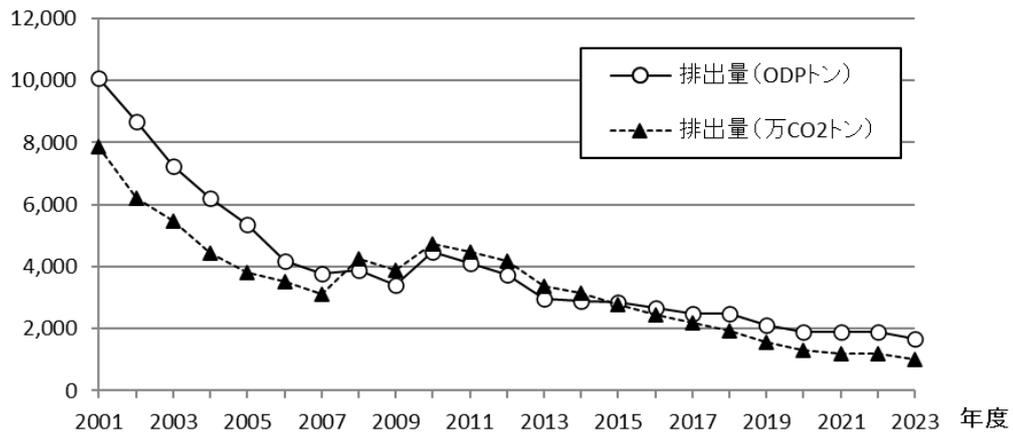


図4-資-11 PRTRに基づくオゾン層破壊物質の排出量(ODP換算、CO<sub>2</sub>換算)

### (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7年2月18日閣議決定)においては、代替フロン等4ガス(HFCs、PFCs、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>)については、2030年において、2013年比59%減の水準(約9百万トン-CO<sub>2</sub>換算)、2040年度において2013年度比80%減の水準(約4.5百万t-CO<sub>2</sub>)にすることを目標としている。

表4-資-8 代替フロン等4ガスの排出量の目標

(単位：百万トン-CO<sub>2</sub>換算)

	2013年 実績	2030年の 排出量の目標	2040年の 排出量の目標
代替フロン等4ガス	37.2	20.9	約11
HFCs	30.3	13.7	約6.9
PFCs	3.0	3.8	約1.9
SF <sub>6</sub>	2.3	3.0	約1.5
NF <sub>3</sub>	1.5	0.4	約0.2

(出典)「地球温暖化対策計画」令和7年2月28日閣議決定

### (6) ノンフロン化の推進

#### ①グリーン購入法に基づくノンフロン化の推進

フロンを使わない製品(ノンフロン製品)の普及を促進するため、「国等による環境物品等の調達に関する法律(グリーン購入法)」に基づき、国等の行政機関に対してノンフロン製品の調達を義務付けている。

表4-資-9 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7(2025)年1月現在）

ダストブロワー	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul> <p>（備考）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>
電気冷蔵庫、 電気冷凍庫、 電気冷凍冷蔵庫	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul> <p>（備考）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「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。</li> </ul>
エアコンディ ションナー	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul> <p>【配慮事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul> <p>（備考）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・「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。</li> </ul>
ガスヒートポン プ式冷暖房機	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul> <p>【配慮事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul> <p>（備考）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「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。</li> </ul>
ヒートポンプ式 電気給湯器	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●冷媒にフロン類が使用されていないこと。</li> </ul> <p>【配慮事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●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</li> </ul> <p>（備考）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「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。</li> <li>・「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。</li> <li>・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。</li> </ul>

表4-資-9 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5(2023)年12月現在）（続き）

自動車	<p>【判断の基準】</p> <p>①乗用車にあつては、次の要件を満たすこと。</p> <p>ア．電動車等であること。ただし、ハイブリッド自動車の場合は、これに加えて表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。）に適合するとともに、表2に示された区分ごとの燃費基準値を満たし、かつ、備考12に示された算定式により算定された燃費基準値を下回らないこと。</p> <p>イ．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。</p> <p>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。ただし、ガソリンを燃料とする場合は、これに加えて表1に示された区分の排出ガス基準に適合すること。</p> <p>ア．電動車等であること。</p> <p>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。</p> <p>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。ただし、ガソリン又はLPガスを燃料とする場合は、これに加えて表1に示された区分の排出ガス基準に適合すること。</p> <p>ア．電動車等であること。</p> <p>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及び表4-2に示された区分の燃費基準値を満たすこと。</p> <p>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。</p> <p>ア．電動車等であること。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>ア．電動車等であること。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>ア．電動車等であること。</p> <p>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。</p> <p>【配慮事項】</p> <p>●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）</p> <p>・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。</p> <p>・「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。</p>
マットレス	<p>【判断の基準】</p> <p>●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）</p> <p>・「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。</p>
断熱材	<p>【判断の基準】</p> <p>●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。</p> <p>・フロン類が使用されていないこと。（備考）</p> <p>・「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。</p>
氷蓄熱式 空調機器	<p>【判断の基準】</p> <p>●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。</p>
ガスエンジン ヒートポンプ式 空気調和機	<p>【判断の基準】</p> <p>●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。</p>

表4-資-9 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5(2023)年12月現在）（続き）

<p>庁舎管理</p>	<p>【配慮事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 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つては、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。</li> </ul> <p>(備考)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「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。</li> </ul>
<p>加煙試験</p>	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 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。</li> </ul> <p>(備考)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「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。</li> </ul>
<p>飲料自動販売機設置</p>	<p>【判断の基準】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 自動販売機本体の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。</li> </ul> <p>【配慮事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 自動販売機本体の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。</li> </ul> <p>(備考)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「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。</li> <li>・「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。</li> </ul>

※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7年1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 4-10 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-資-10 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
第12期 2024～2026年	52,560万ドル	7,154万ドル

表4-資-11 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

## 1-4. 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.20) 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、累次にわたって改正・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-資-12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。\*

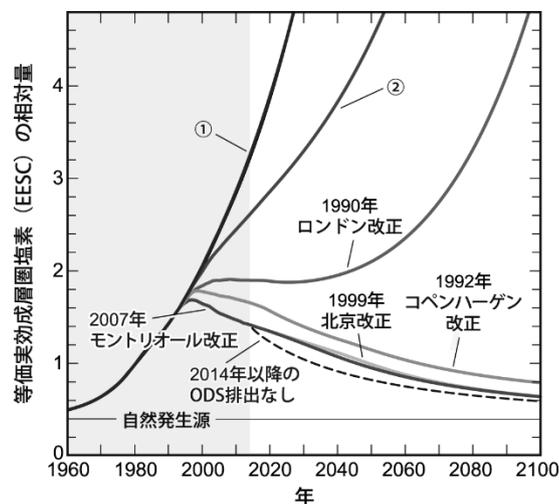


図4-資-12 モントリオール議定書のEESCの削減効果

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。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-資-12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-資-13 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の 2000 年のオゾン全量（図 4-資-13 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-資-12 からわかる通り、2000 年の時点では規制の有無による EESC の値の差はさほど顕著でないことと矛盾しない。一方、ODS に対する規制無しのシナリオ下でのオゾン全量の 2020 年以降の変化については、2020 年には南極域のオゾン全量は年平均でもオゾンホール基準である 220m atm-cm を下回り、2040 年には、北極域並びに低緯度域でも年平均のオゾン全量が 220m atm-cm 程度になることが予測されている。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、オゾンホールの基準である 220m atm-cm を下回る予測となっており、深刻な影響が見込まれることが分かる。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-資-14 に示す。南半球では、ほぼ南極を中心に 220 m atm-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。

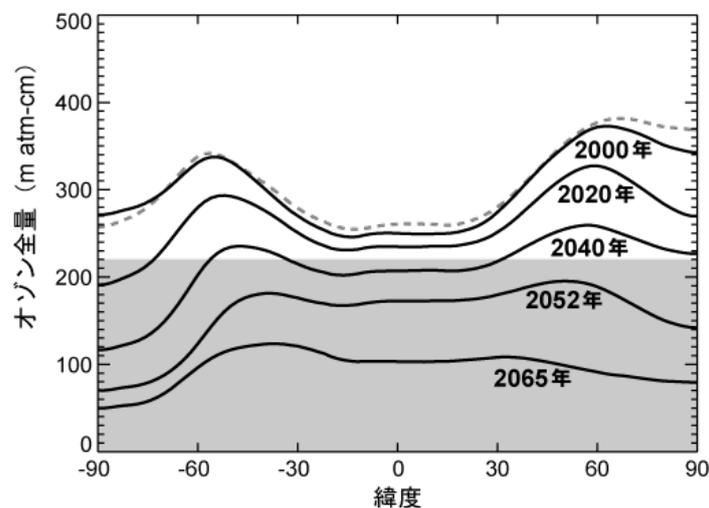


図 4-資-13 モントリオール議定書によるオゾン層の保護効果

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 220m atm-cm 以下の部分。

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

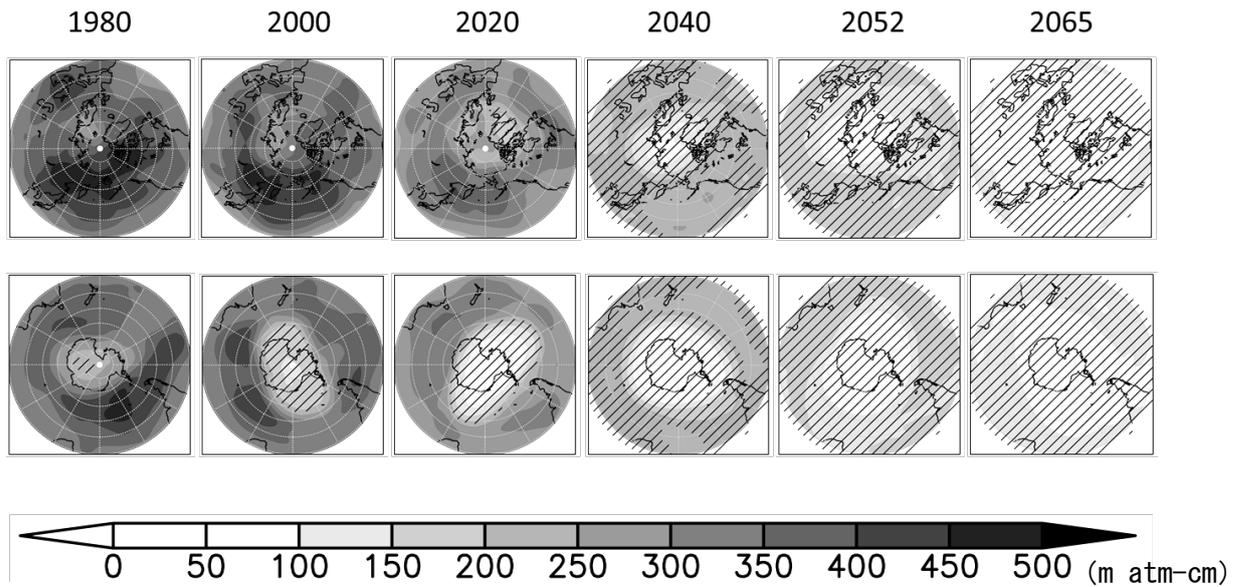


図4-資-14 北半球中高緯度（上）および南半球中高緯度（下）のオゾン全量分布の経年変化

モントリオール議定書によるオゾン層破壊物質の規制がないと仮定した場合のオゾン全量の予測値の分布を濃淡で表す。北緯45度～90度の1月～4月および南緯45度～90度の9月～11月の領域と期間で、それぞれオゾン全量が最低値を示した日の分布を示す。濃淡のスケールの数字の単位は m atm-cm。オゾン全量が 220 m atm-cm 以下を示す領域を黒の斜線で示す。（出典）国立環境研究所秋吉英治氏提供データ

ODS に対する規制が取られなかった状況を仮定して計算されたオゾン全量の減少は、地上付近での太陽紫外線の増加にも大きな影響を与える。図4-資-13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-資-15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。

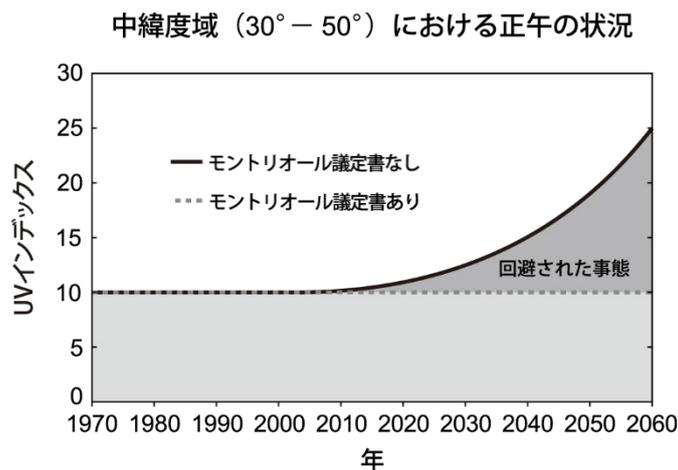


図4-資-15 北半球中緯度帯のUVインデックスの予測（仮定）

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: 2014Assessment (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-資-16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。

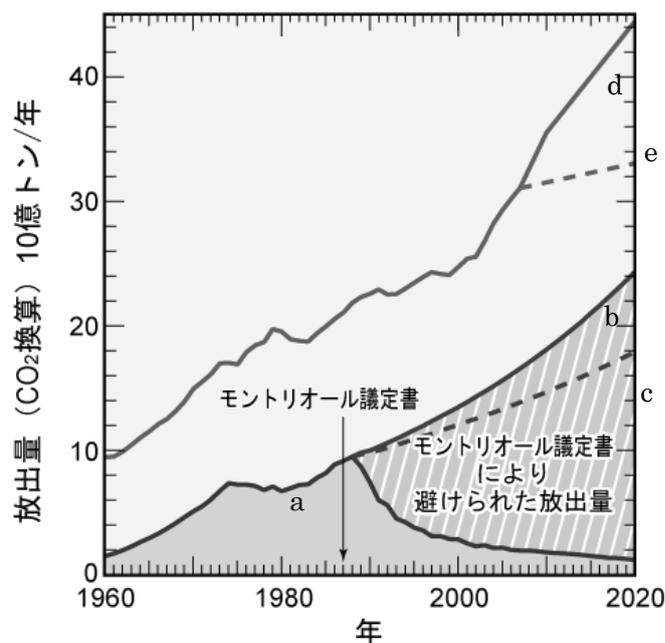


図4-資-16 地球温暖化係数で重み付けした放出量（CO<sub>2</sub>換算）

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、パリ協定において削減対象となっている。図 4-資-17 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。

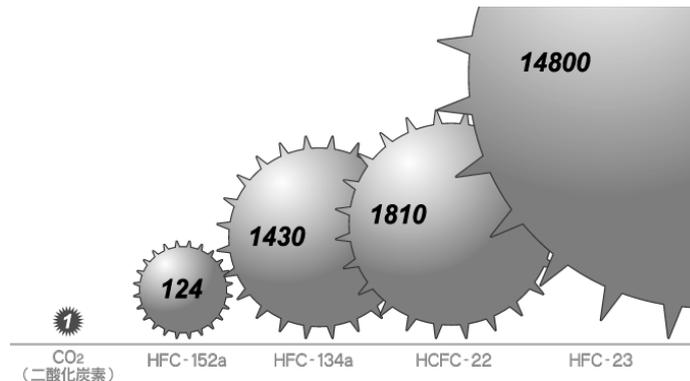


図 4-資-17 HFC の地球温暖化係数

二酸化炭素を 1 とした場合の HFC の地球温暖化係数を示したものである。

(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-資-18)。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。

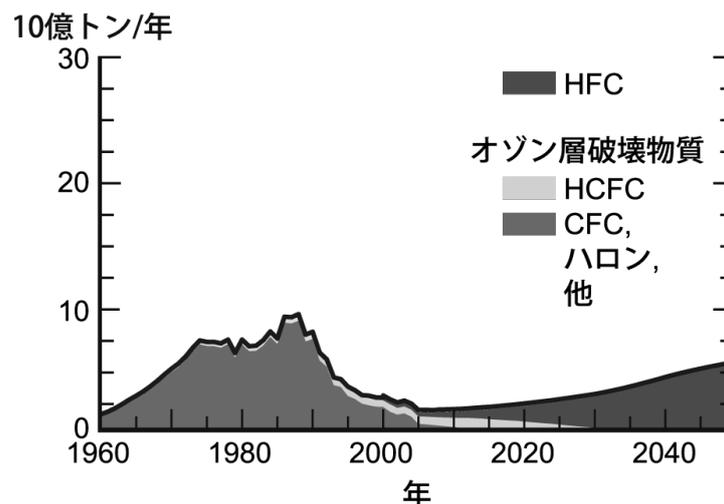


図 4-資-18 地球温暖化係数で重み付けした HFC の放出量予測

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

## 参考資料1. クロロカーボンの性質および用途

クロロカーボンの性質・用途						
		常温での状態	現在の主な用途	オゾン層破壊効果	モントリオール議定書の対象	VSLs (※1)
メ タ ン 系	クロロメタン (塩化メチル)	気体	医薬品、農薬、発泡剤の原料	●	—	—
	ジクロロメタン (塩化メチレン、DCM)	液体	溶剤 (低沸点用有機) HFC (R32) の原料	●	—	●
	トリクロロメタン (クロロホルム、CFM)	液体	HCFC (R22) の原料	●	—	●
	テトラクロロメタン (四塩化炭素、CTC)	液体	HFO (R1234yf) の原料	●	●	—
エ タ ン 系	クロロエタン (塩化エチル)	気体	ポリエチレンの製造触媒の原料、発泡ポリスチレンの発泡剤	—	—	●
	ジクロロエタン (EDC)	液体	塩化ビニルモノマーの原料	●	—	●
	トリクロロエタン	液体	塩化ビニリデンの原料、塩素化ゴムの溶剤	●	●	△※2
	テトラクロロエタン	液体	他の塩素化炭化水素の製造における中間物	●	—	●
エ チ レ ン 系	クロロエチレン (塩化ビニル)	気体	ポリ塩化ビニル (PVC) の原料	●	—	●
	ジクロロエチレン	液体	塩化ビニリデン樹脂の原料	●	—	●
	トリクロロエチレン (TCE)	液体	HFC (R134a) の原料 溶剤 (油脂、樹脂、塗料)	●	—	●
	テトラクロロエチレン (パークロロエチレン、PCE)	液体	HFC (R134a) の原料	●	—	●

※1 VSLs: Very Short-Lived Substancesの略称。大気中での寿命が6か月未満の、極短寿命物質。

※2トリクロロエタンには2つの異性体があり、1,1,1-トリクロロエタンの寿命は5年、1,1,2-トリクロロエタンの寿命は約50日から半年程度。