

第1部 オゾン層の状況

1. オゾン層の形成と分布・その変動

46億年前の地球誕生以来、地球上に海が生まれ、海の中の光合成生物によって大気中に大量の酸素が放出された結果、太陽光による酸素の光分解によって地球大気上層にオゾン層が形成されることとなった。オゾン層が形成されると、オゾン自身が太陽光を吸収してその周辺の大気を暖めるため、オゾン層周辺では上層の気温は下層より高くなる。この気温の逆転層を成層圏と呼んでいる。成層圏のオゾンは地球上の生物に有害な紫外線を吸収し、その地表への到達を防ぐことによって、地表生物の生存を可能にする重要な役割を担っている。ここではオゾン層の形成、オゾン層の分布と変動、及び人間活動によるオゾン層破壊について解説する。

1-1. オゾン層の形成・分布・破壊

大気中でのオゾンの生成

大気の主成分の一つである酸素分子は、太陽からの紫外線のうちエネルギーの高い（波長の短い）紫外線を吸収し2個の酸素原子に解離する。生成した酸素原子は周りの酸素分子と結合してオゾンを生成する。エネルギーの高い太陽紫外線は、大気中の酸素分子に吸収されるため、高度が低くなるにつれて強度が弱まる。一方、分解される酸素分子の量は高度が低い方が多いので、この2つの量のかねあいにより、オゾンが生成される効率はある高度で最大になる。

一方、生成されたオゾンは大気中での分解反応（詳細は第1部参考資料1（P49）を参照のこと）により消失する。またオゾンは、大気の運動によってある場所から別の場所に輸送される。そのため、オゾンの分布は、大気中でのオゾンの生成・分解反応とオゾンの輸送のバランスによってきまってくる。

オゾンの高度分布

図1-1-1にオゾン濃度の高度分布を示す。図からも分かる通り、オゾンの多く（大気中のオゾンの約90%）は地上から約10kmから50kmの高度領域に存在しており、「オゾン層」と呼ばれる。図1-1-1にはオゾン濃度の高度分布と合わせて、気温の高度分布が示されている。地表面から高度10数kmまでは、高度が高くなるに従って気温が低くなる。そのため、この高度領域は対流活動が起こることから、「対流圏」と呼ばれる*。一方、高度約10kmより高い、オゾンが多く存在している高度領域では、高度が高くなるに従って気温が高くなる。このような下層より上層の大気が暖かい温度構造が見られることには、オゾン層の存

* 対流圏のオゾンは、成層圏からの輸送ならびに対流圏での光化学的な生成によって供給されている。なお、対流圏には酸素分子が吸収し解離を起こすようなエネルギーの高い太陽紫外線が到達しないため、対流圏では成層圏とは異なったメカニズムでオゾンが生成される。

在が関係している（詳細は第1部参考資料1（P49）を参照のこと）。この高度約10kmから50km付近までの気温が高度とともに上昇している領域は「成層圏」と呼ばれる。

オゾン層は、太陽から地球にやってくる、生物に有害な紫外線（UV-B）をほとんど（約90%）吸収する。一方、オゾン分子は生物にとって有害な物質である*。地表面に生物が生存できるのは、このオゾン分子が地表面から離れた高度領域にオゾン層として存在し、有害紫外線に対するシェルターとして働いているおかげである。オゾン層によって吸収されなかったごく少量のUV-B（長波長側のUV-B）は地表面に到達するので、地上生物はそれに対する防御機能を備えるようになったといわれている。しかし、過度にUV-Bを浴びることは人の健康や動植物に悪影響を及ぼすおそれがある。

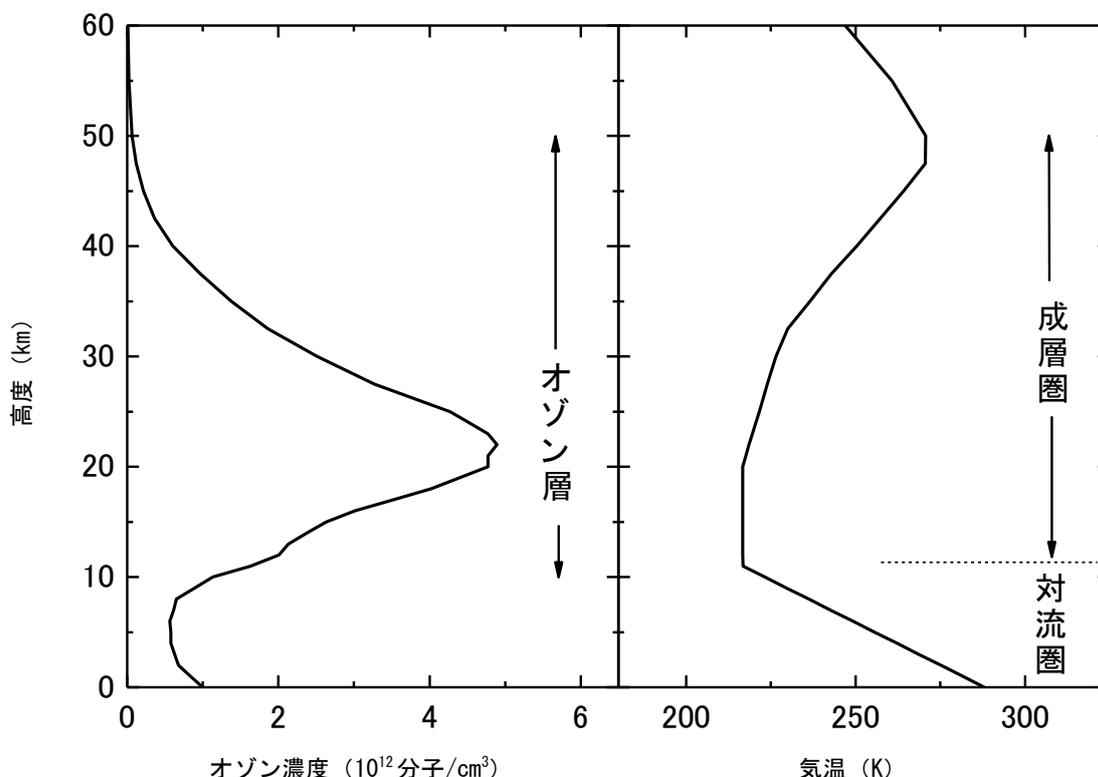


図1-1-1. オゾン濃度の高度分布（左図）及び気温の高度分布（右図）
 （出典）US Standard Atmosphere（1976）をもとに作成

オゾン全量の地球規模の分布

オゾン量は、太陽紫外線照射量や大気中輸送量の違いによって、緯度・経度や季節による違いがある。低緯度上空の成層圏では、太陽紫外線の豊富な照射によりオゾンが多く生成される。このオゾンを含む熱帯大気は、大規模な成層圏大気の循環（赤道域で上昇して、南北方向に枝分かれし、成層圏中を中高緯度に向かい、そこで下降する大規模な平均的な

* 成層圏に存在するオゾンも対流圏に存在するオゾンも化学的には同一の物質である。しかしながら、対流圏に存在するオゾンは人の健康や作物・生物等に悪影響を及ぼすため、汚染物質として扱われ、「悪いオゾン（スモッグオゾン）」と称されることがある。一方、成層圏に存在するオゾンは、生物に有害な紫外線の防御機能の役割を果たすため、「良いオゾン」と称されることがある。

流れの場で、提唱者の名前にちなんでブリューワ・ドブソン循環と呼ばれる)に乗って中高緯度の下部成層圏に運ばれる。

衛星観測によるオゾン全量*の地球規模の分布を図1-1-2に示す。オゾン全量は赤道域では少なく、南北両半球とも中・高緯度域で多く、特にオホーツク海上空は最も多い。また、緯度方向の変化は、中緯度では南半球に比べて北半球で大きく、日本上空は世界的に見ても最も大きい。

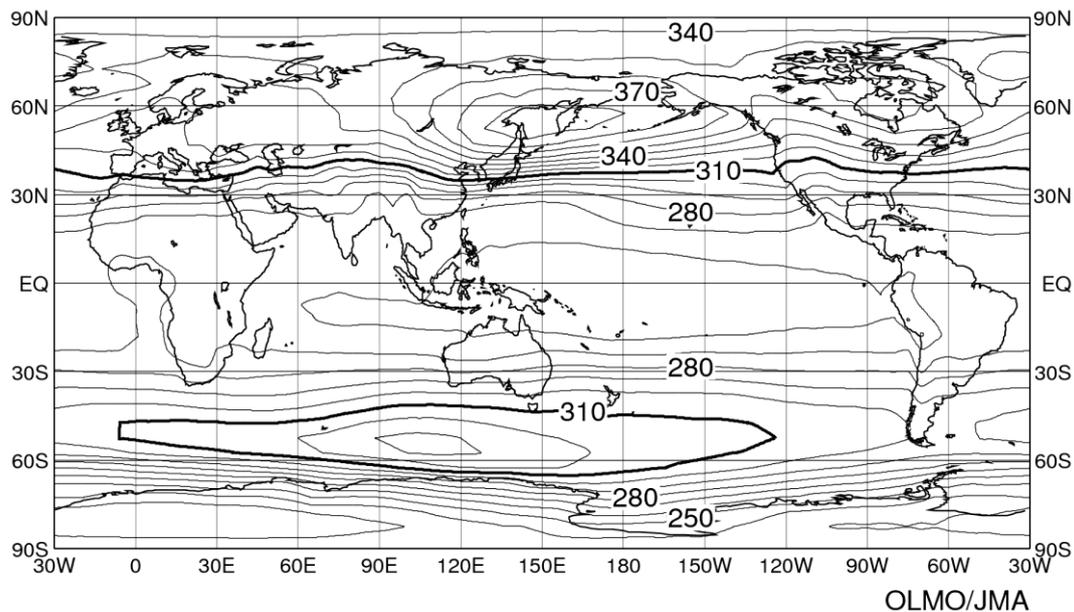


図 1-1-2 世界の年平均オゾン全量 (1997～2006 年の平均値)

単位は $m \text{ atm}\cdot\text{cm}$ 、等値線間隔は $10 m \text{ atm}\cdot\text{cm}$ 。NASA提供の衛星データ (TOMS及びOMIデータ) をもとに作成。(出典) 気象庁 オゾン層観測報告: 2010より

* 地表から大気上端までの鉛直気柱に含まれるすべてのオゾンを積算した量をオゾン全量という。これは、大気中のオゾンをすべて1気圧、 0°C として地表に集めた層の厚さに相当する量である。 cm 単位で表した厚みを1000倍した数値が使いやすいので、便宜的にこの単位を $m \text{ atm}\cdot\text{cm}$ (ミリ・アトモスフェア・センチメートル)又はDU (Dobson Unit; ドブソン単位)と称している。地球全体の代表的なオゾン全量は $300 m \text{ atm}\cdot\text{cm}$ であるから、代表的なオゾン層の厚みは 3 mm だといえる。ちなみに、大気全体の厚みを同じ方法で表すと 8 km となる。

1-2. オゾン量の変動

オゾン量は、季節により変動する。また、より長期的には QBO（準 2 年周期振動）、太陽黒点活動（約 11 年周期）などに対応した変動がある。また成層圏に達するような火山の大規模噴煙も一時的にオゾン量に影響を与えることが知られている。人為的要因によるオゾン層の変化を精度よく検出するためには、これらの自然要因による変動成分を正しく把握しておくことが必要である。

オゾン全量の季節変動

東西方向に平均したオゾン全量の1997～2006年の平均値の季節変動を図1-1-3に示す。一般的に中高緯度域のオゾン全量は、南北半球ともに春に最大となり、秋に最小となる季節変動が見られる。これは、赤道域から中高緯度への成層圏大気の大規模輸送が冬に最も活発となるためと理解されている。

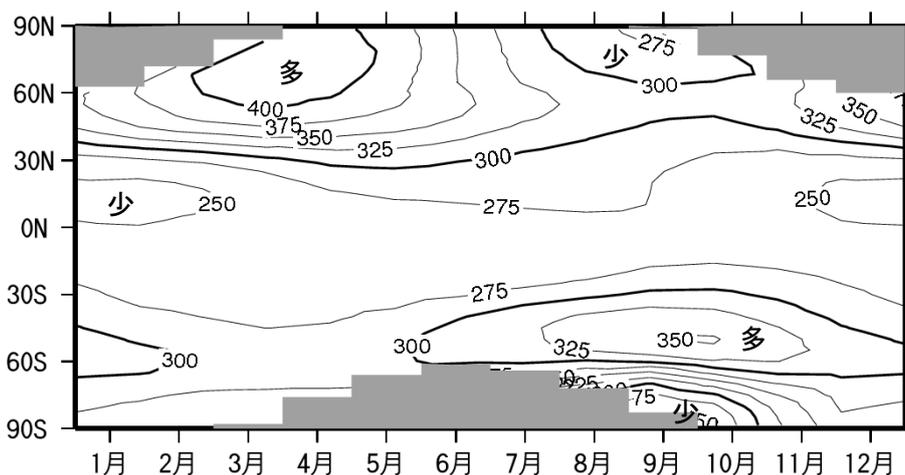


図 1-1-3 オゾン全量（1997～2006 年の平均値）の季節変動

単位は m atm-cm、等値線間隔は 25m atm-cm。NASA 提供の衛星データ（TOMS 及び OMI データ）をもとに作成。図中、極域での等値線のない点域があるのは、太陽光が射さなくなる冬季の両極域では観測できないため。（出典）気象庁 オゾン層観測報告：2010 より

太陽黒点活動(太陽紫外線量及び成層圏力学過程の変動)

太陽黒点活動に伴ってエネルギーの高い太陽紫外線の放射量変動することは、人工衛星により観測されている。この変動に伴って上中部成層圏におけるオゾンの生成量変動するので、太陽黒点活動の極小期と極大期の間で世界平均のオゾン量は2～3%変動することがわかっている。また、上中部成層圏で吸収される太陽紫外線エネルギーの増加は成層圏気温の上昇をもたらすので、これによって成層圏大気の大循環場の変動が起こり、下部成層圏でもオゾン輸送の変動を通じてオゾン濃度が変動するという説が提案されている。

赤道上空成層圏の風向変化(準2年周期振動)

赤道付近の下部成層圏では東風と西風が約2年の周期で交代することが知られており、この現象は準2年周期振動(QBO)と呼ばれている。QBOに伴ってオゾン全量も地球規模で変動することがわかっており、赤道上空で東風の時は低緯度でオゾン全量が平均値より少なく、中緯度では平均値より多くなること、西風の時は低緯度でオゾン全量が平均値より多く、中緯度では平均値より少なくなることが観測データにより確認されている。この相関関係のメカニズムについては、赤道上空成層圏の東西風の変動と南北方向の大規模循環の変動とが結びついたものであろうと考えられている。

大気の大規模循環場の変動

一般的にいて、大気の大規模な流れの強さの変動によってオゾン量は変動する。成層圏において低緯度域から高緯度域へのオゾン輸送量が多くなると高緯度域におけるオゾン量が多くなる。こういった成層圏大気の大規模循環の長期的変動がオゾン層に与える変動については、詳しいことはまだよくわかっていない。また、対流圏の循環場の変動とオゾン層との関連も気候変化の影響を受けることもあり、今後の研究の進展が待たれる(詳細は第1部4-4 (b) オゾン層の変化が対流圏気候に及ぼす影響 (P47~48) を参照のこと)。

大規模火山噴煙

大規模な火山噴火の後で、例えば1991年のピナトゥボ火山噴火後の1992年と1993年には、北半球全体でオゾン全量の減少が観測された。これは、下部成層圏に注ぎ込まれた火山噴煙中の二酸化硫黄が硫酸エアロゾル粒子に変成し、その粒子表面での不均一相反応によってオゾンの消滅反応が促進されたためであるとされている。

1-3. 人為起源物質によるオゾン層破壊

成層圏中に極微量に存在し、オゾンを触媒反応によって破壊する成分である水素酸化物(HO_x)、窒素酸化物(NO_x)、塩素酸化物(ClO_x)、臭素酸化物(BrO_x)などには、自然界の大気供給源に加えて、近年の人間活動の増大による人為的供給源が無視できないものがある(詳細は第1部参考資料1 (P50) を参照のこと)。水素酸化物は自然界の水に比べれば人為起源のものは問題にならない。窒素酸化物の起源物質としては、一酸化二窒素と上空に直接排出される NO_x が人為起源物質として問題になる。 ClO_x と BrO_x には自然界の発生源として塩化メチルと臭化メチルがあるが、 ClO_x に対してはクロロフルオロカーボン(CFC)など、また BrO_x に対してはハロンや燻蒸用途などに用いられる臭化メチルが人為起源物質である。特に1960年代以降、人間活動に伴うCFCやハロンなどの人為起源物質の放出が著しく増加したことが引き金となり、オゾン層破壊が問題となった。

2. 世界と日本のオゾン層の観測状況

オゾン層の観測は、気球などを使って測定器を上空まで運び、その場でオゾン分子の濃度を直接測る方法と、オゾン分子による光の吸収や発光を用い間接的に濃度を算出する遠隔測定方法がある。遠隔測定では主に大気中の積分全量を計測するが、方式によっては高度分布まで測定できる。また、測定器を載せるプラットフォームにより、地上からの観測、人工衛星からの観測、気球を用いた観測などに分類できる。

地上観測体制

世界のオゾン観測地点を図 1-2-1 に示す。各観測点は北半球中緯度の陸上に偏在しており、低緯度、南半球、海洋等では、観測点の密度がまだ不十分といえる。我が国では現在、札幌・つくば（館野）・那覇・南鳥島・南極昭和基地において気象庁が観測を行っている。

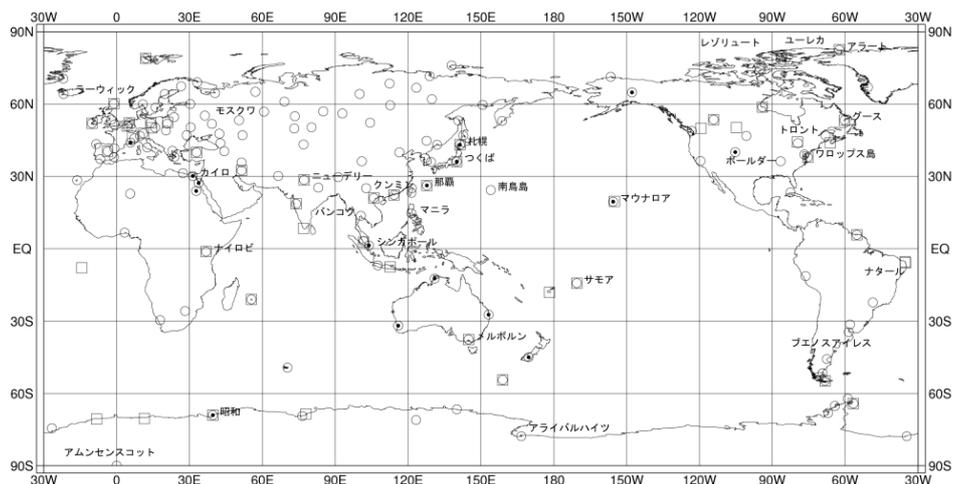


図 1-2-1 オゾン観測地点の分布(2009～2013 年)

全量観測は 152 地点 (○印)、反転観測は 16 地点 (●印)、オゾンゾンデ観測は 51 地点 (□印)。
 (出典) 気象庁提供データ オゾン層・紫外線の年のまとめ (2013 年) より

衛星観測体制

人工衛星搭載センサーによる観測は、同一の測定器で地球全体を広くカバーし、地上観測だけではカバーできない広い海洋上や内陸地のデータが取得でき、これまで世界各国の衛星・測定器で観測が行われてきた。環境省では、衛星搭載センサー ILAS 及び ILAS-II の開発を行い、国立環境研究所において、データ処理解析とデータ利用研究を進めた。

気象庁では、継続性と安定性で世界的に見ても信頼性のある米国製衛星観測器 TOMS と OMI で得られたデータ*を基に解析を行っている。

* 気象庁では、2007 年 12 月以降の OMI のデータについて、地上観測値との偏差が大きいことなどから長期的な変化傾向を解析する際には補正を行っている。

3. オゾン層の監視結果

3-1. 地球規模のオゾン層の状況

(a) オゾン量のトレンド解析

既知の自然要因による変動の除去

オゾン量のトレンド（長期変化傾向）をより正確に評価するためには、既知の様々な自然要因によるオゾン変動を取り除くことが必要である。そのためオゾン量の観測値から、季節変動、太陽黒点活動の変動（約 11 年ごと）、準 2 年周期振動（QBO）及び大規模火山噴煙による影響を差し引いた時系列を計算する。こうして得られるオゾン量の長期的な変動は、成層圏における実効的な塩素濃度（EESC*）の時系列と関連づけて理解されている（詳細は第 1 部 4.オゾン層の将来予測（P38～48）を参照のこと）。

図 1-3-1 には自然要因による変動成分を除去した世界の地上観測によるオゾン全量月平均値（細線）と EESC の変化曲線に対応するオゾンの変化成分（滑らかな実線）が描かれている（EESC はこの期間、1990 年代後半付近にピークを持つ上に凸の時系列となるが、その符号を反転してフィッティングされている）。このように EESC の変化曲線を当てはめることで、オゾン層の経年変化のうちオゾン層破壊物質の影響による変化成分を取り出して理解することができる（この手法を「EESC フィッティング」と呼ぶ）。

図からわかるように、上記の自然変動要因による変動成分を除去した世界の地上観測によるオゾン全量月平均値は EESC フィッティング曲線にほぼ対応して推移している。また、オゾン量の長期的な変化はその特徴から、1980 年代のほぼ直線的な減少傾向、1990 年代前半から後半にかけての減少傾向の緩和、及び 1990 年代後半からの緩やかな増加傾向に分類できる。このように、EESC フィッティングは地球規模のオゾンの変化傾向を理解する上で分かりやすい手法である。

トレンドの評価方法及びその留意点

本報告書では、オゾン量のトレンドとして、EESC がほぼ直線的な増加傾向にあった 1980 年代を中心とする期間、及び EESC が減少傾向に変化した 1990 年代後半**以降の 2 つの期間に着目して、3 種類のオゾン変化量を求めることとした。具体的には、①オゾン減少期（1980 年代）のトレンドとして、既知の自然要因による変動成分を取り除いたオゾン量データに対し EESC フィッティングを施し、フィッティング曲線上の 1979 年の値（図 1-3-1

* EESC（等価実効成層圏塩素）とは、塩素及び臭素によるオゾン破壊効率が異なることを考慮して臭素濃度を塩素濃度に換算して求めた成層圏での塩素・臭素濃度のことをいう。

** オゾン量の変化傾向が転換するのは 1990 年代半ば頃だが、地点や要素によって異なるので、回帰係数を求める期間を統一するために、中緯度用の EESC の変化傾向が転換する年（1996 年末）を用いて整理している。具体的には、EESC が増加している 1979～1996 年と EESC が減少する 1997 年以降に分けている。

の Y_{1979} ）と 1989 年の値 (Y_{1989}) の差から 1980 年代における変化量を求め、10 年当たりのオゾン量の変化（10 年間のパーセント変化）としてオゾン層破壊物質による影響を考慮したトレンドを表記した。また、②オゾン回復期（1990 年代半ば以降）のトレンドは 1997～2013 年のデータから求めた。さらに、③1979～2013 年の変化については、EESC フィッティング曲線上の 2013 年の値 (Y_{2013}) と 1979 年の値 (Y_{1979}) との差を百分率 ($(Y_{2013} - Y_{1979}) / Y_{1979} \times 100$ (%)) とすることで、1979 年を基準とした 2013 年の変化の割合 (%) の評価も行っている。なお、本報告書では、観測値をある期間の平均値などの基準となる値と比較する際、その差を百分率で示す場合には「偏差 (%)」として表している。

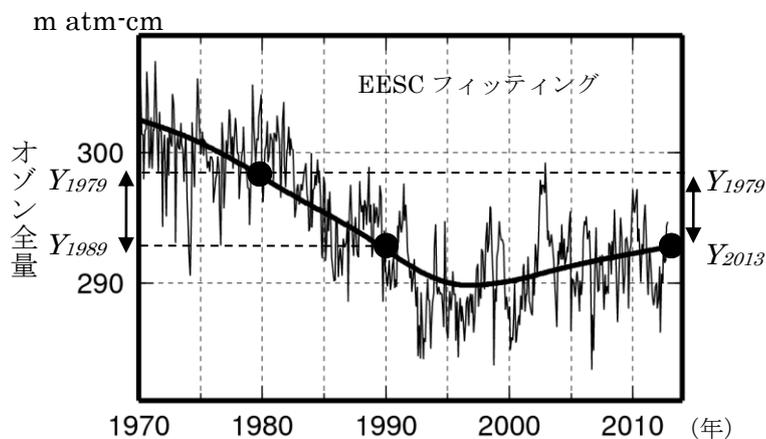


図 1-3-1 EESC フィッティングによるトレンド解析

既知の自然変動要因による変動成分を除去した世界の地上観測によるオゾン全量月平均値と EESC フィッティング曲線を模式的に示したもの。●は EESC フィッティング曲線上の値を示している。
 (出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ (2013 年) より

EESC フィッティングの変化曲線（図 1-3-1）は、EESC の濃度の経年変化に比例して変動することから、1980 年代から 1990 年代半ばまでの「大きな減少」と、1990 年代半ば以降の「緩やかな増加」に変化傾向を分類できる。領域平均したデータについては、概ねこのような変化傾向が当てはまるが、個別の観測地点のデータでは、個々の地点の自然変動などの要因によって必ずしも当てはまらない場合がある。このため、個別の観測地点のデータについては、EESC フィッティングの代わりに、EESC が最大値となる 1996 年末を転換点とした折れ線フィッティングによるトレンド解析から長期変化傾向を算出した（図 1-3-2。折れ線フィッティングについては参考資料 12 (P74) を参照のこと）。 Y_{1979} を折れ線上の 1979 年の値、 Y_{2013} を折れ線上の 2013 年の値とすると、2013 年のオゾン量 (Y_{2013}) の 1979 年に対する変化の割合を $(= (Y_{2013} - Y_{1979}) / Y_{1979} \times 100$ (%)) として求めた。また、1980 年代の変化傾向は折れ線の前半部直線の傾きから求めた（単位は%/10 年）。

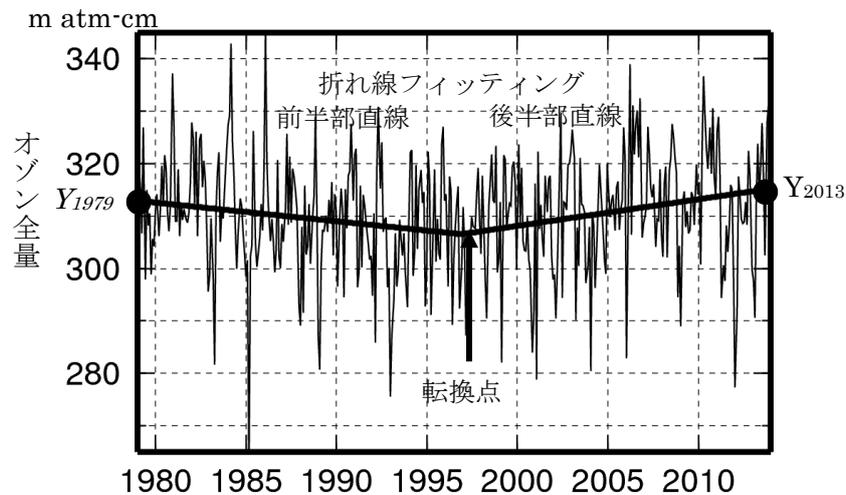


図1-3-2 折れ線フィッティングによるトレンド解析

自然変動要因による変動成分を除去したつくばの地上観測によるオゾン全量月平均値と折れ線フィッティングによる直線を模式的に示したもの。●は折れ線上の値を示している。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

なお、本報告書において、折れ線フィッティングを使用して長期変化傾向を算出した図表は下記のとおり。

- 図1-3-10下段 【P25：南極昭和基地上空のオゾン分圧のトレンドの高度分布】
 図1-3-18、表1-3-1、表1-3-2 【P34～35：日本上空のオゾン全量の長期変化傾向】
 図1-3-19下段 【P36：日本上空のオゾンの高度別トレンド】

世界のオゾン量の長期変化傾向を求めるために使用したEESCの値は、1996年末にピークとなり、以後減少している。このため、本報告書では1997年以降のオゾン量の変化を「最近の変化傾向」として評価した。具体的には、世界のオゾン全量（第1部3-1（b）（c））では、1997年以降のデータに直線回帰を当てはめて変化傾向を算出した。国内および南極昭和基地の地点（第1部3-3（a）（b）、3-2-1（a）（b））では、折れ線回帰の後半部の直線から1997年以降のトレンドを算出した。

第1部3-1（b）オゾン全量のトレンド及び（c）オゾン全量のトレンドの分布及び季節変動（P16～19）で使用する地上観測地点の選択にあたっては、毎月の月平均値と衛星による観測データとの全期間を通じた比較において、データの精度に大きな問題がないと判断されることを基準とした。また、観測機器の変更等により観測データに不自然な段差がみられる場合には、その観測データに補正を施したのち、解析を行った。衛星観測データの扱いについては第1部参考資料11（P71～73）を参照のこと。

(b) オゾン全量のトレンド

地上及び衛星からの観測による月平均オゾン全量の偏差（%）（1970～1980 年の平均値を基準とする）の経年変化を図 1-3-3 に示す。オゾン全量は 1980 年代から 1990 年代前半にかけて地球規模（北緯 70 度～南緯 70 度）で大きく減少しており、1980 年代のオゾン全量の減少率を求めると、世界平均では $1.8 \pm 0.1\%/10$ 年、北半球中緯度では $2.3 \pm 0.3\%/10$ 年、南半球全体では $2.2 \pm 0.2\%/10$ 年であった。低緯度では $0.5 \pm 0.1\%/10$ 年と減少の割合は小さい。一方、1990 年代後半以降のオゾン全量には、ほとんど変化がないかわずかな増加がみられる。2013 年現在のオゾン全量は、1979 年に比べて世界平均で $2.0 \pm 0.1\%$ 減少している。

この 1990 年代前半までの減少傾向は、周期性のある既知の自然変動要因のみからは説明できず、CFC 等の大気中濃度の増加が主要因であると考えられる。特に 1980 年代以降の南極域上空のオゾンホールのはげしい発達は、大気中の CFC 等の濃度増加によると考えることが最も妥当である。一方、1990 年代後半以降ではオゾン全量にほとんど変化が無いかわずかな増加が認められることについては、オゾン層破壊物質の緩やかな減少に関係していると思われるが、大気循環の変化も影響しているとする研究も報告されている（WMO, 2011、Hadjinicolaou et al., 2005）。

北半球では、1993 年頃に最小値を記録したが、これは、ピナトゥボ火山噴火（1991 年 6 月）の影響で、成層圏のエアロゾル粒子が増加し、その粒子表面での不均一相反応のためオゾン破壊が促進されたためと考えられている。

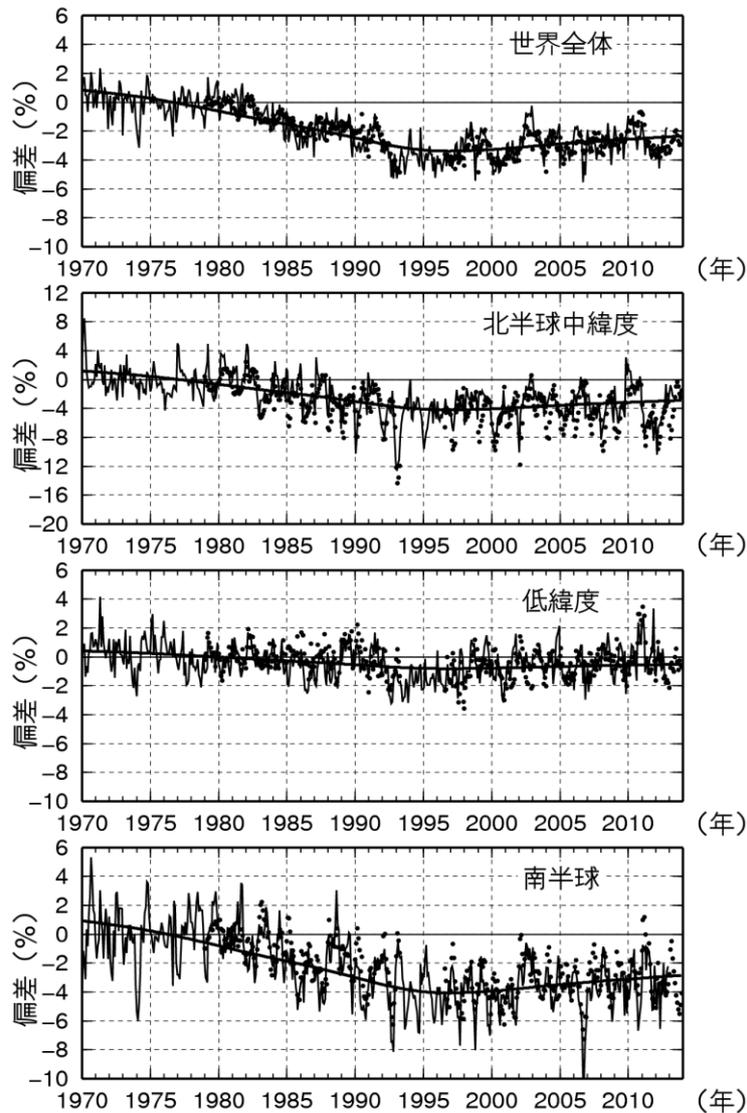


図 1-3-3 世界のオゾン全量偏差 (%) の経年変化

実線は世界の地上観測によるオゾン全量偏差 (%)。●印は衛星観測データで、太陽活動など既知の周期的な自然要因と相関の高い変動成分は除去している。比較の基準は1970～1980年の平均値。滑らかな実線は地上観測データに対するEESCフィッティング曲線。上段から世界全体（衛星観測データは北緯70度～南緯70度の平均）、北半球中緯度（北緯30度～60度平均）、低緯度（北緯30度～南緯30度平均）、南半球全体（衛星データは0度～南緯70度平均）のオゾン全量の変化の割合を示す。世界の地上観測点数は63地点。北半球中緯度は39地点、低緯度は12地点、南半球は9地点。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

(c) オゾン全量トレンドの分布及び季節変動

オゾン全量トレンドの地球規模の分布

観測されたデータによる2013年の緯度帯別オゾン全量の1979年からの変化の割合（%）を図1-3-4に示す。衛星観測（左図●印）では低緯度を除き統計的に有意な減少がみられ、減少の割合は高緯度ほど大きくなっている。特に南半球高緯度では約10%減少している。

一方、1997年以降のオゾン全量（右図）は、北緯40度～南緯30度、南緯60度～70度では、衛星観測で有意な増加傾向がみられた。北半球中緯度の北緯40～50度では、増加傾向がみられたが有意ではなかった。地上観測データからは、全般に増加傾向の地点がみられるが、北緯45度付近より北では負偏差を示す地点が多くなり、ばらついている。北半球中緯度の1997年以降の増加傾向には、力学的な要因が寄与している可能性があり、また、成層圏の塩素量は現在、ピークを過ぎたとしてもその減少量はわずかであるため、塩素量の減少だけがオゾン全量の増加傾向の原因であると結論することはできない。

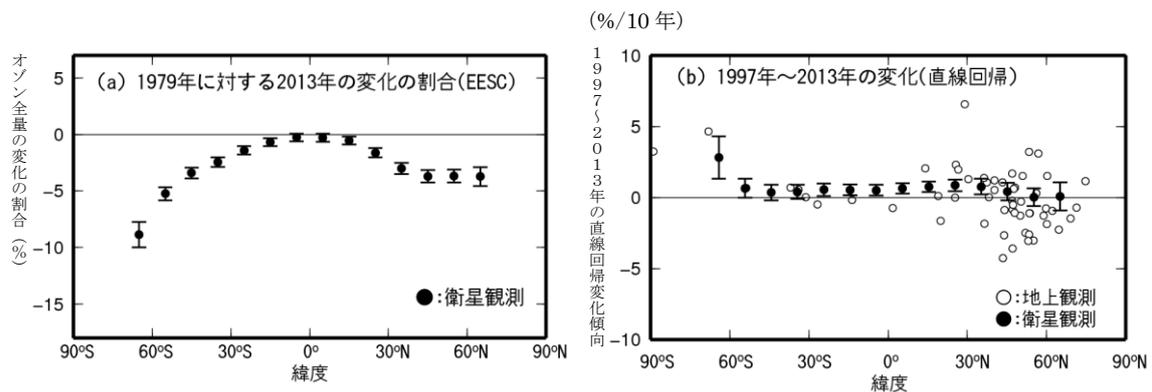


図 1-3-4 オゾン全量緯度別トレンド

オゾン全量の長期変化傾向を示す。左図では、緯度帯（10度）毎の衛星観測データ（●印）をプロットしている。2013年オゾン全量の1979年からの変化の割合（%）でありEESCフィッティングを用いて求めた。右図は地上観測データ（○印）と衛星観測データ（●印）の1997～2013年のデータから直線回帰により求めた変化傾向（%/10年）。左図と右図の衛星観測データの縦線は95%信頼区間の範囲。世界の観測地点（56地点。2010年以降の観測データのない地点は除いた）のオゾン全量データ及びNASA提供の衛星観測データから作成。（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

オゾン全量トレンドの季節変動(衛星データ)

オゾン全量のトレンドの季節変動をみるため、2013年の緯度別・月別オゾン全量の1979年からの変化の割合（%）を図1-3-5に示す。北半球の高緯度では3～4月に、南半球中・高緯度では8～12月にオゾン全量の減少の割合が大きい。

両半球高緯度域の春季に特に顕著な減少傾向があるのは、冬季の低温条件下で塩素や臭素がオゾンを破壊しやすい物質となって蓄積され、太陽光の照射を受ける春季に特にオゾン層破壊を進行させるためと考えられる（詳細は第1部参考資料1（P53-55）を参照のこと）。

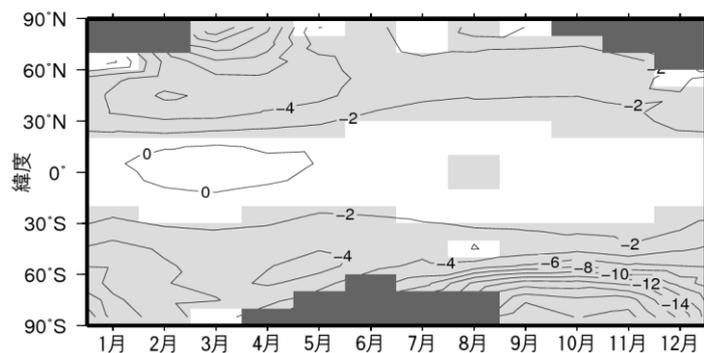


図 1-3-5 緯度別・月別オゾン全量の 1979 年からの変化の割合（%）

2013年オゾン全量の1979年からの変化の割合（%）の月別分布。EESCフィッティングを用いて求めたもの。等値線間隔は2%。薄い陰影部は95%信頼区間で減少している領域。濃い陰影部は欠測域（太陽高度角の関係で観測できない領域）。NASA提供の衛星観測データから作成。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

(d) オゾンの高度別分布のトレンド

オゾンの高度分布のトレンド(地球規模)

オゾンの鉛直分布のトレンドをみるため、1980年代のオゾン量の変化傾向（%/10年）を緯度高度別に示したものを図1-3-6に示す。北半球では、中緯度から高緯度にかけての、40km付近と20km付近以下の2つの高度に減少率の大きい領域がみられる。南半球でも、中緯度から高緯度にかけての40km付近は減少率が大きい領域が見られる。

高度40km付近と高度20km付近のオゾン減少は、ともにCFC等から解離した塩素によるものであるが、高度40km付近の減少は、気相反応のみによって働く触媒反応サイクルによるのに対し、高度20km付近の減少は主にエアロゾル粒子表面での不均一相反応によって活性化される別の触媒反応サイクルによると考えられている（詳細は第1部参考資料1（P50）を参照のこと）。

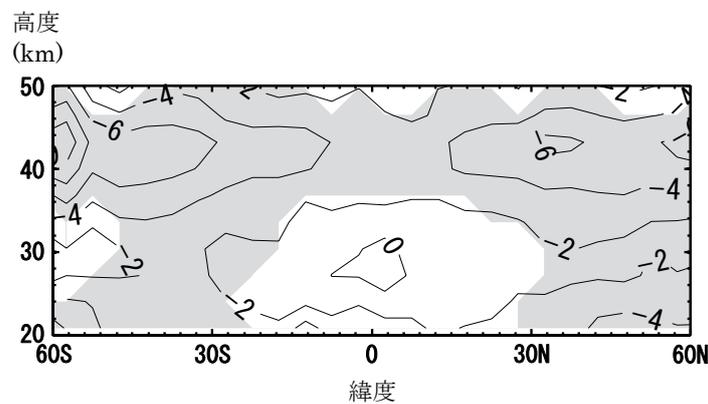


図 1-3-6 オゾン量の 1980 年代の変化傾向（%/10 年）の緯度・高度分布

オゾン量の 1980 年代の変化傾向（%/10 年）。SAGE 衛星データで補正した最新の SBUV データを用いて EESC フィッティングを行い、1980 年代のオゾンの変化傾向（%/10 年）を求めたもの。等値線間隔は 2%。薄い陰影部は 95%信頼区間で減少している領域。

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

(e) 2013 年のオゾン全量の状況

世界のオゾン全量偏差(%)の分布(2013年)

2013年の世界のオゾン全量偏差(%)の分布を図1-3-7に示す。2013年の世界の年平均オゾン全量の分布を、長期的な減少がみられなくなった近年(1997~2006年の平均値)の分布と比較すると、北半球中緯度では、特に北太平洋のアラスカ湾上空付近で-5%以上の負偏差がみられた。これらの領域では1月、2月、4月と10~12月に例年よりも対流圏界面が高かったことがわかっており、オゾン全量負偏差に対応していると考えられる。低緯度域では、1997~2006年の平均値よりも多い領域が赤道付近で帯状に広がっている。一方、南半球中緯度では負偏差が卓越した。このような低緯度域での帯状のオゾン全量偏差のパターンはQBO(準2年周期振動)の影響が大きいと考えられる。南極大陸のほとんどの領域で1997~2006年の平均値より10%以上多く、一部では15%以上多かった。これは、南極オゾンホールが例年と同程度か小さい規模で推移したことに対応している。

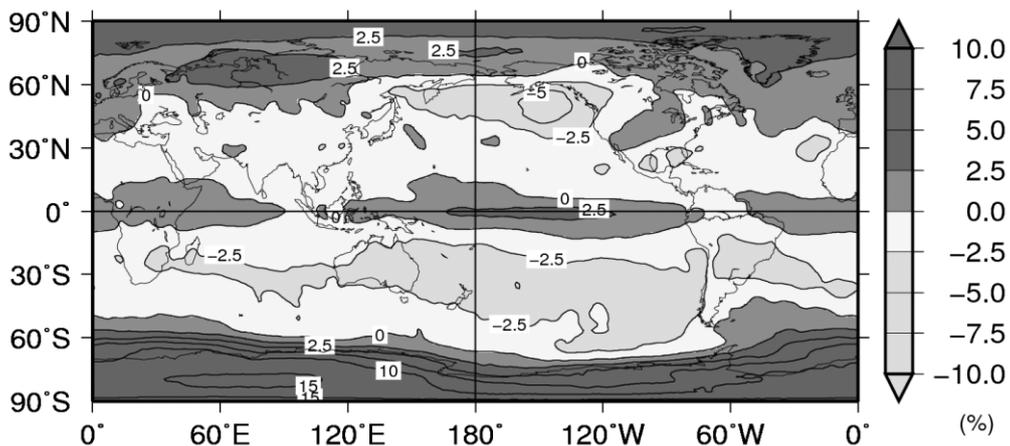


図1-3-7 世界のオゾン全量偏差(%)の年平均分布図(2013年)

月平均オゾン全量偏差(%)の年平均分布。等値線は-10%~+10%では2.5%間隔、±10%以上では5%間隔。1997~2006年の平均値を比較の基準とした。北緯60度以北の1月と11~12月及び南緯60度以南の5~7月は、太陽高度角の関係で観測できない時期があるため省いて年平均を計算した。NASA提供の衛星観測データから作成。※口絵III参照。

(出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2013年)より

3-2. 極域のオゾン層の状況

3-2-1. 南極域上空のオゾン層の状況

1980 年代初め以降、南極域上空では、毎年 8~12 月にオゾン量が極端に減少し、オゾンホールと呼ばれる現象が発生する。南極域上空のオゾン層の状況に関して、オゾン全量の経年変化、高度別トレンド、及び 2013 年のオゾン全量は以下のとおりである。

(a) オゾン全量の経年変化

オゾンホールの経年変化(衛星データ)

オゾンホールの面積、最低オゾン全量、オゾン欠損量（破壊量）の極値及びオゾンホール消滅日（オゾンホールの目安である 220m atm-cm 以下の領域が消滅した日）の経年変化を図 1-3-8 に示す。南極オゾンホールの規模は 1980 年代から 1990 年代半ばにかけて急激に拡大したが、1990 年代後半以降は、年々変動による増減はあるものの、長期的な拡大傾向はみられなくなった。しかし、オゾンホールの規模は依然として大きい状態が続いている。

2013 年のオゾンホールの最大面積(2,340 万 km²)は、過去（2003~2012 年）の平均値（2,500 万 km²）と同程度だった。2013 年のオゾン欠損量の最大値（7,450 万トン）は、過去（2003~2012 年）の平均値（8,530 万トン）と同程度だった。オゾンホールはほぼ毎年大規模に形成されており、年々変動が大きいいため、現時点でオゾンホールに縮小の兆しがあるとはまだ言えず、南極域のオゾン層は依然として深刻な状況にある。

オゾンホール消滅日は、1990 年頃まで年々遅くなる傾向があった。1990 年代半ば以降は 2002 年に早く（11 月中）消滅した他は、12 月に消滅することが多く、2013 年の消滅日は 11 月 18 日であり、1990 年代以降では 2002 年、2012 年について 3 番目に早かった。

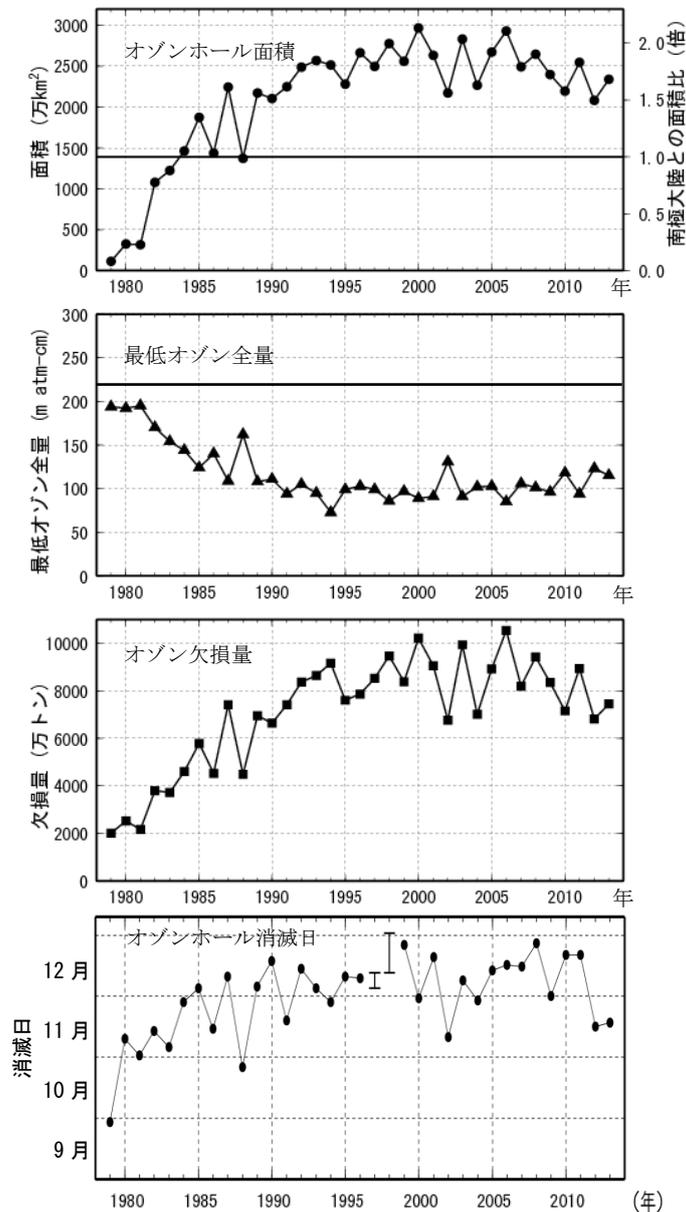


図 1-3-8 オゾンホールの規模及び消滅日の経年変化（1979～2013 年）

1979～2013年のオゾンホールの面積、最低オゾン全量、オゾン欠損量の年極値、220m atm-cm以下の領域が消滅した時期の変化。いずれの図もNASA提供の衛星データをもとに作成。オゾンホール面積の図の横直線は南極大陸の面積、最低オゾン全量の横直線はオゾンホールの目安である220m atm-cmを表す。1995年は、オゾンホールの消滅日についてはSBUV/2を、それ以外の図はTOVSの高分解能赤外放射計のデータをもとに作成した。なお、1997年及び1998年は、衛星データの一部（1997年12月5日～13日、1998年12月13日～1999年1月2日）が得られていないため、消滅日を特定できていないが、縦棒で示した期間中に消滅したと推定される。（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

（参考） 南極オゾンホール規模の定義

オゾンホール規模の目安として、オゾンホールの面積、最低オゾン全量、オゾン欠損量（破壊量）の3要素が以下のように定義されている。

オゾンホール面積：南緯45度以南でのオゾン全量が220m atm-cm以下の領域の面積

最低オゾン全量：オゾンホール内のオゾン全量の最低値

オゾン欠損量：南緯45度以南のオゾン全量を300m atm-cm（オゾン全量の地球規模の平均値）に回復させるために必要なオゾンの質量

月平均オゾン全量の経年変化(昭和基地上空)

オゾンホールの縁辺となることが多い南極昭和基地における春～秋季にかけての月平均オゾン全量の経年変化を図1-3-9に示す。オゾンホールの時期にあたる9月から12月のオゾン全量が、1980年頃から長期的に減少している。2013年のオゾンホール時期のオゾン全量は、12月を除き1990年代半ば以降の中では多かった。なお、2002年の9月から11月にオゾン全量が大きく増加しているのは、9月に南極域で大規模な成層圏突然昇温が発生し、成層圏の気温が過去50年で最高となるような特異な気象条件となり、オゾン破壊が大規模に進まなかったことによる。

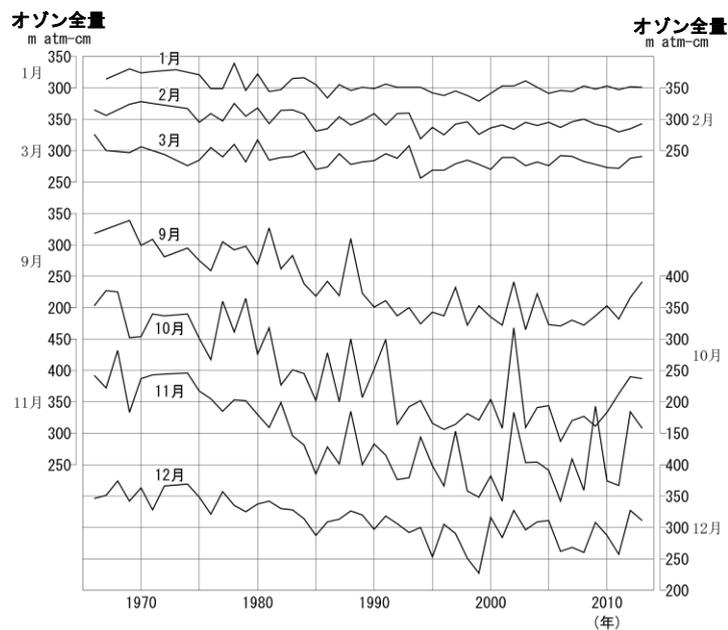


図 1-3-9 南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化（毎年 1～3 月、9～12 月）
 （出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013 年）より

(b) 高度分布のトレンド

南極昭和基地上空における1980年以降のオゾンゾンデ観測による高度別オゾン分圧のトレンドを図1-3-10に示す。これは、太陽活動など既知の周期的な自然要因と相関の高い変動成分を除去した後、折れ線フィッティングにより求めた値である。

2013年のオゾン分圧の1979年からの変化の割合（%）の鉛直分布（図上段）をみると、通年では高度15km付近でのオゾン減少が大きく、春季（9～11月）は特に顕著である。また、1997年以降の変化量（図下段）には、通年では、高度10km（200hPa）～高度18km（70hPa）付近で、春季では高度13km（150hPa）～高度18km（70hPa）付近で有意な増加傾向が見られたが、それ以外の高度では有意な傾向は見られず、オゾン分圧が低い状態が続いている。

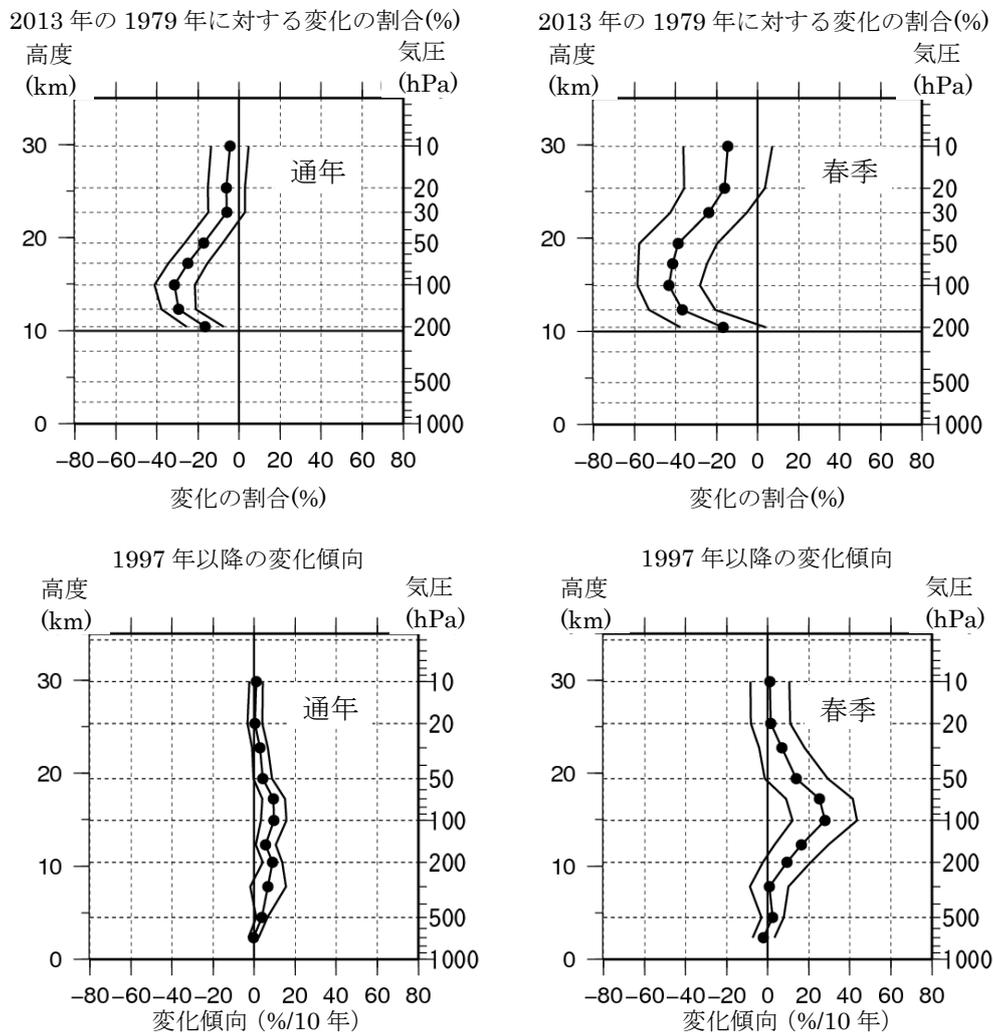


図1-3-10 南極昭和基地におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

●印はオゾンゾンデ観測から求めた高度別オゾン分圧のトレンド。上段は、2013年のオゾン分圧の1979年からの変化の割合（%）。下段は、1997年以降2013年までのデータを用いて求めた変化傾向（%/10年）である。横軸は変化量、縦軸は高度。外側の折線は95%信頼区間の範囲。左（通年）は月別値から、右が春季（9～11月）の値から求めた変化傾向。折れ線フィッティングによる解析から求めた。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

(c) 2013 年の南極域におけるオゾン全量
オゾンホール規模の推移(衛星観測)

衛星観測データの日別値から求めた2013年オゾンホールの規模の推移を図1-3-11に示す。

2013年のオゾンホールは、例年と同様に8月に発生し、その面積は9月16日に今年の最大面積である2,340万km²（南極大陸の約1.7倍）まで拡大した。その後、10月上旬以降急速に縮小し、過去（2003～2012年）の同期間と比べて小さい規模で推移し、11月18日に消滅した。オゾン欠損量は、9月16日に最大となる7,450万トン、最低オゾン全量は9月29日に年最低値である115m atm-cmとなった。

2013年の最大面積は、過去10年間（2003～2012年）の平均値（2,500万km²）と同程度だった。2013年のオゾン欠損量の年最大値は、過去10年間（2003～2012年）の平均値（8,530万トン）と同程度で、最低オゾン全量の年最低値は、1990年代以降で2002年、2012年、2010年について4番目に大きかった。

2013年の最大面積は過去10年間（2003～2012年）の平均値（2,500万km²）と同程度だったが、10月以降は過去の同時期と比べて小さく推移し、早めに縮小した。これは、南極下部成層圏の気温が10月以降、例年と比べて高く推移したこと、また、極渦が安定せず、低緯度側からのオゾン量の多い空気塊の流入が促進され、オゾンホールの発達が妨げられたことが要因と考えられる。

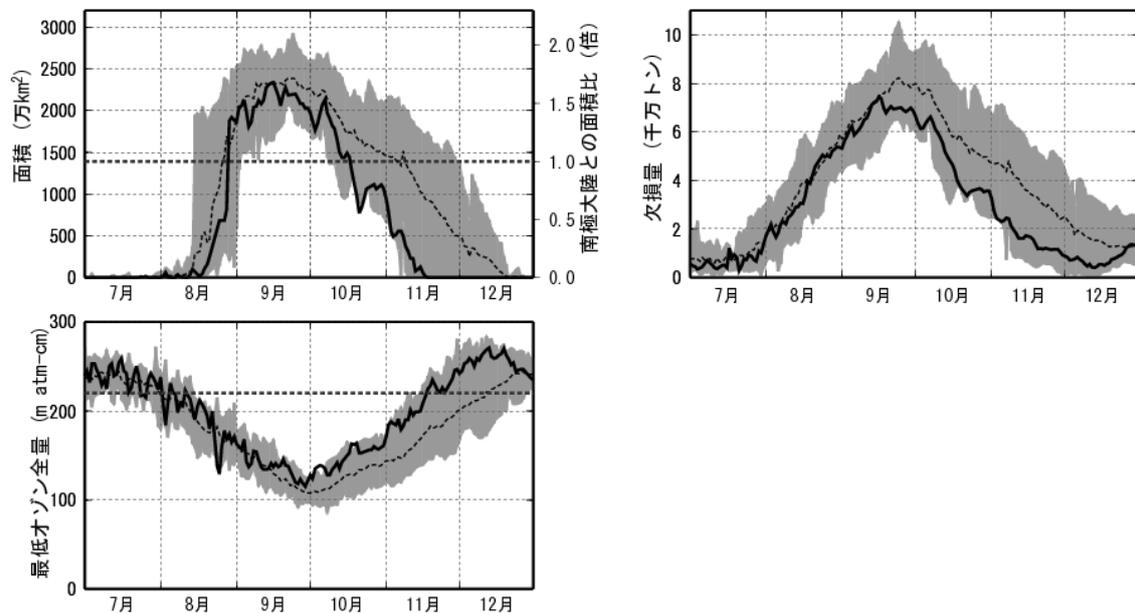


図 1-3-11 オゾンホールの規模の推移（2013年7月～2013年12月）

実線は2013年、破線は過去10年間（2003～2012年）の平均値、陰影部の上端と下端は、同期間の最大（最高）値と最小（最低）値を示す。また、面積の図の横破線は南極大陸の面積、最低オゾン全量図の横破線はオゾンホールの広がりを目安となる220 m atm-cmを表す。NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

月平均オゾン全量・日別オゾン全量(南極昭和基地の地上観測)

昭和基地上空の月平均オゾン全量を図1-3-12に示す。2013年は、1994～2008年の平均値と比較すると、オゾンホール期間の9～11月に「多い」となった。

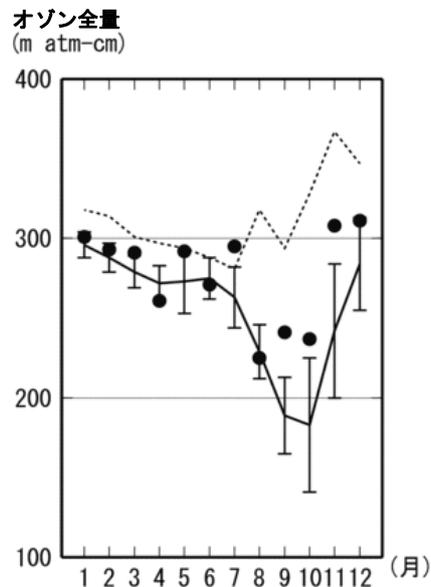


図 1-3-12 南極昭和基地における月平均オゾン全量 (2013 年)

●印は2013年の月平均値。点線はオゾンホールが出現する以前の1961～1980年の平均値。折線（実線）は1994～2008年の平均値で、縦線はその標準偏差である。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

昭和基地で観測したオゾン全量の日代表値の変動を図1-3-13に示す。

9月下旬にオゾンホールの目安である 220m atm-cm を大きく下回り、9月25日に2013年の最小値である 161m atm-cm を記録した。その直後から10月中旬には、オゾン全量が 220 m atm-cm を上回ることが多くなった。特に10月はじめには過去の最大値となる日もあった。11月6日以降は 220 m atm-cm よりも高くなり、以後ほぼ 300～370 m atm-cm の範囲で推移した。

9月下旬から10月中旬以降のオゾン全量が多くなった原因は、昭和基地がオゾンホールの外側のオゾン全量の多い領域に入ったことに対応している。

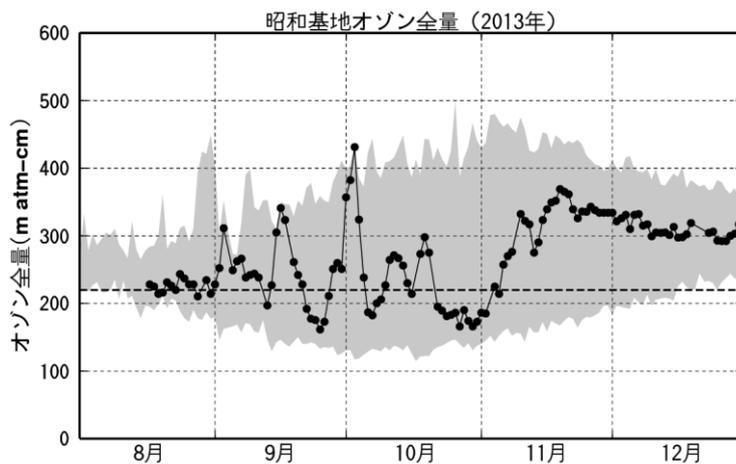


図 1-3-13 南極昭和基地における日別オゾン全量の推移（2013年8月～2013年12月）
●は2013年の観測値（日代表値）。陰影部の上端と下端は観測開始（1961年）以来の最大及び最小値。横破線はオゾンホールを目安である220m atm-cmの値。
（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

(参考) 南極域上空の最低気温等の推移 (2013 年)

オゾンホール形成に大きな役割を果たす極域成層圏雲は、 -78°C 以下の低温状態が持続する場合に生成される。

図1-3-14に、2013年の南極域上空の下部成層圏の最低気温及び気温が -78°C 以下の面積の推移を示す。2013年の南極域の50hPaの日最低気温*は、例年と同じ5月中旬から10月上旬まで -78°C 以下となり、8月中旬までは過去の平均値(1979~2012年)より概ね低く推移した。その後過去の平均値を中心に上下し、10月中旬以降はほとんどの期間で過去の平均値より高い状態だった。 -78°C 以下の面積の推移を見ると、6月下旬まで過去の平均値より大きく推移したが、7月から9月中旬までは過去の平均値を中心に上下し、9月下旬以降は概ね過去の平均値より小さくなり、10月上旬に面積がゼロとなった。

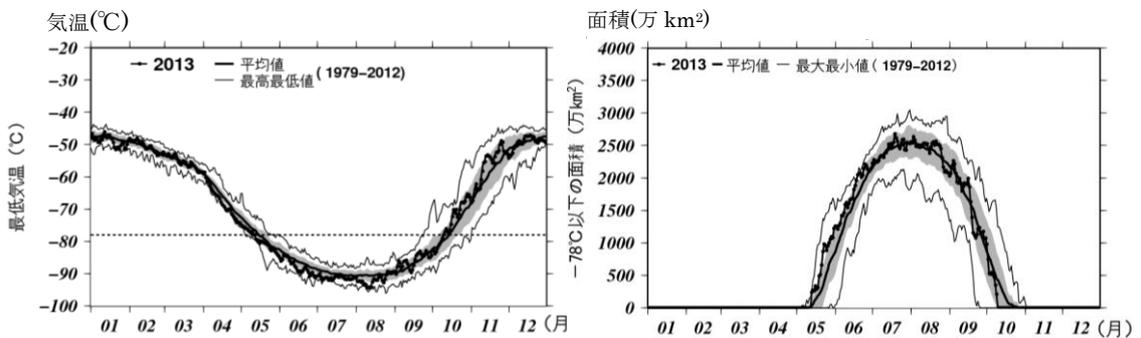


図 1-3-14 南極域上空の下部成層圏の最低気温 (左) 及び気温が -78°C 以下の領域の面積 (右) の推移 (2013 年 1 月~2013 年 12 月)

南緯60度以南の50hPa(高度約20km)面における日別の最低気温の推移(左図)と極域成層圏雲の出現する目安となる -78°C 以下の領域の面積の推移(右図)。●印は2013年の値を示す。陰影中の太実線は1979~2012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。左図中の横の直線は極域成層圏雲出現の目安である -78°C 。

(出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2013年)より

* 「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。

3-2-2. 北半球高緯度域のオゾン層の状況

北半球高緯度域でも、南極オゾンホールほど大規模ではないものの、オゾンの少ない領域が現れることがある。北半球高緯度域のオゾン層の状況に関して、オゾン層の推移、及び2013年のオゾン全量は以下のとおりである。

(a) 北半球高緯度域のオゾン層の経年変化

北半球高緯度域のオゾン層の状況をみるために、北半球高緯度域の3月の月平均オゾン全量偏差を図1-3-15に示す。衛星データによると、1990年以降、データの無い1995、1996年を除き、 -20 m atm-cm を超える負偏差が22年のうち17回現れており、北半球高緯度域でのオゾン全量は1990年以前に比べ顕著に減少する年が多い。最近では、2011年の衛星データによるオゾン全量は1997年に次いで2番目に少なかった。なお、TOMSデータの無い1995、1996年については、SBUV/2のデータを用いた解析によると、両年ともに春季にオゾン全量の大きな減少が観測されている（NOAA,2005）。ラーウィック（英国）での地上観測の結果でも、1990年以降、春季に顕著なオゾン減少が現れており、特に1996、1997、2005年、2012年は -60 m atm-cm を超える規模であった。このうち1996年は、約 -80 m atm-cm の負偏差がみられた。2013年は、大規模なオゾン層破壊が起きず、衛星データとラーウィックの地上観測値はともに -20 m atm-cm 程度の負偏差にとどまった。高緯度域のオゾン全量の経年変化はEESC（詳細はP13脚注を参照のこと）に対応して世界的に長期的に変化しているとともに、北極域上空の極渦の状態など気象条件に対応しても変動している。北半球では、気象条件によるオゾン全量の年々変動が大きいいため、長期的な変化傾向は見えにくくなっている。

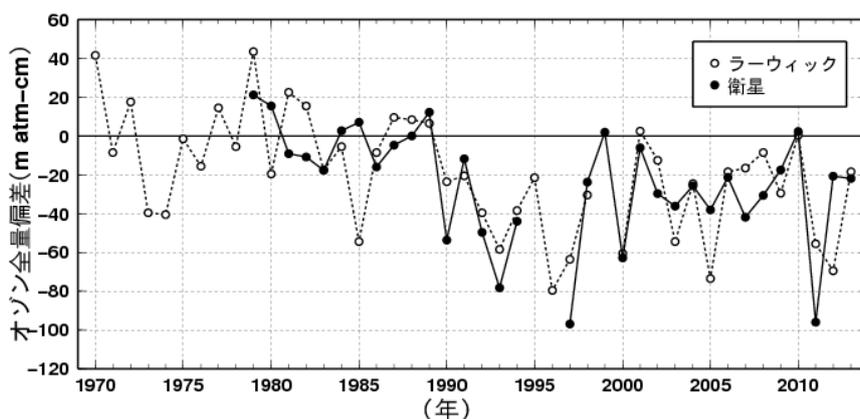


図 1-3-15 北半球高緯度域の3月のオゾン全量偏差の経年変化

●印はNASA提供のTOMS及びOMIデータをもとに気象庁で作成した北半球高緯度（北緯60度以北）域の3月の平均オゾン全量（1979～1989年の平均値）からの偏差。なお、1995、1996年はTOMSデータがない。○印は、ラーウィック（英国、北緯60度、西経1度）の3月の平均オゾン全量の1979～1989年の平均値からの偏差を示す。（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

(b) 2013 年の北半球高緯度域のオゾン層の状況

衛星観測によれば、2013年春季の北半球高緯度では、大規模なオゾン全量の減少はみられなかった。北半球高緯度の3月の月平均オゾン全量は、1997～2006年の平均値と比較して主に東半球側で正偏差となり、ロシア西部から西シベリアにかけては+10%以上多かった。一方、北半球高緯度域において-10%以上の負偏差はみられなかった。

北極域は南極域と違って安定した極渦が発達しにくく、その年の気象条件によって、低温域が広がったり狭かったりと変動しやすい。2013年の北極域の下部成層圏の最低気温、及び-78℃以下の面積の推移を図1-3-16に示す。

2012年下旬から2013年の北極域の下部成層圏の最低気温の推移をみると、2012年11月下旬から-78℃以下となり、2012年12月末までほぼ過去の平均値より低く推移したが、2013年1月上旬に気温が急速に上昇し、その後、-78℃を上回った。極域成層圏雲出現の目安である-78℃以下の領域の面積は、2012年11月末～12月末まではほぼ過去の平均値より大きく推移したが、2013年1月はじめに急速に縮小し、消滅した。このように、極域成層圏雲が出現する目安である-78℃以下の面積が大きい状況は長期間継続しなかったため、2013年春季の北極域で極域成層圏雲に関係した大規模なオゾン破壊が起きなかったと考えられる。

なお、成層圏の塩素濃度が依然高い状況のもとでは、低温域が広がる気象状況になれば、今後も顕著なオゾン減少が北極域で生じると予想され、観測結果について引き続き注目していく必要がある。

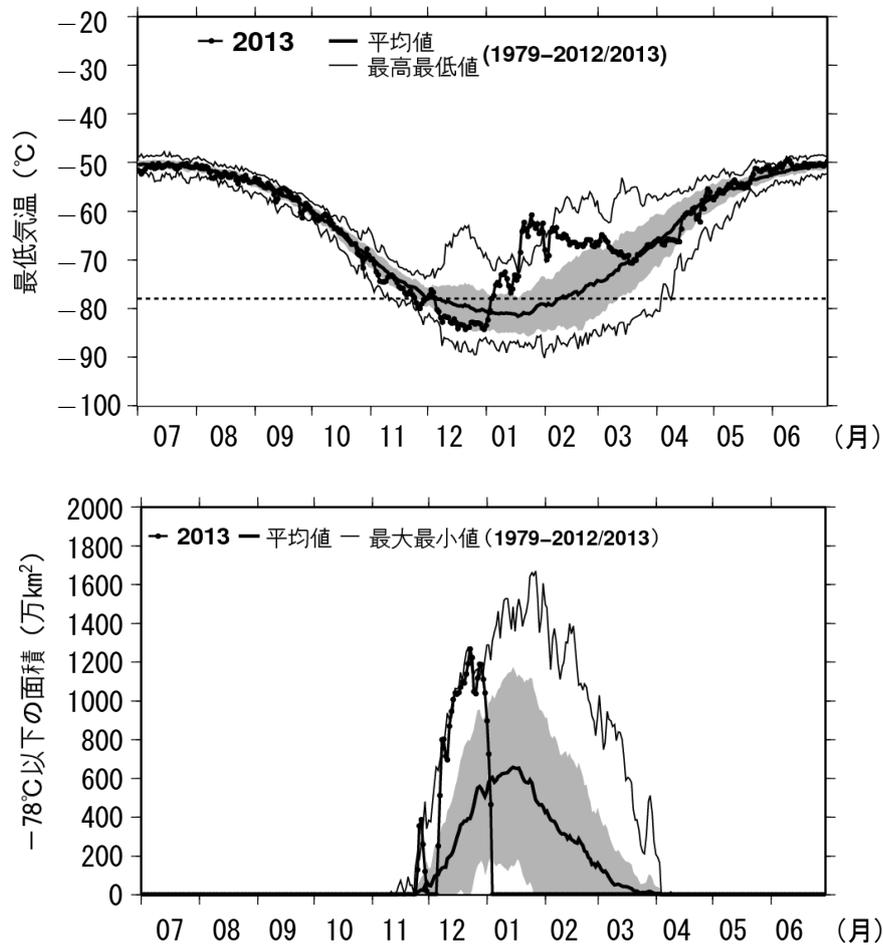


図 1-3-16 北極域上空の下部成層圏の最低気温（上）及び気温が -78°C 以下の領域の面積（下）の推移（2012年7月～2013年6月）

北緯60度以北の高度約20kmにおける日別の最低気温の推移(上図)と極域成層圏雲の出現する目安となる -78°C 以下の領域の面積の推移(下図)。●印は2012年7月～2013年6月の値を示す。陰影中の実線は7～12月は1979～2011年、1月～6月は1979～2012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。上図中の横の破線は極域成層圏雲出現の目安である -78°C 。
 （出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

3-3. 我が国におけるオゾン層の状況

(a) 日本上空のオゾン全量のトレンド

オゾン全量の経年変化

札幌、つくば、那覇、南鳥島のオゾン全量の年平均値の経年変化を図1-3-17に示す。なお、この図は3-1 (a) で述べた既知の自然要因による変動を除去する処理を行っていない（詳細はP13を参照のこと）。よって、図に見られるオゾン全量の変化には、太陽活動（約11年周期）や準2年周期振動（QBO）等の自然要因によるオゾン変動の影響が含まれていることに注意する必要がある。日本上空のオゾン全量は、札幌とつくばにおいて主に1980年代を中心に1990年代初めまで減少が進んだ。また1990年代後半以降には各地点とも増加傾向が見られる。

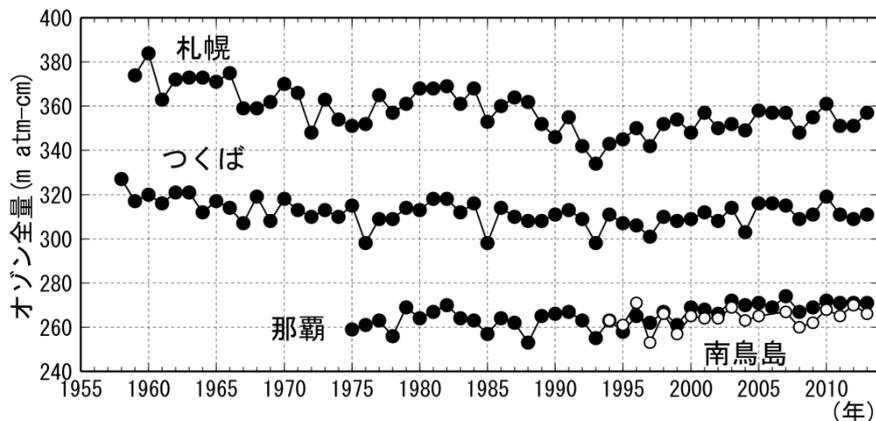


図 1-3-17 日本上空のオゾン全量の年平均値の経年変化（1958～2013年）

札幌、つくば、那覇（以上●印）、南鳥島（○印）におけるオゾン全量の観測開始から2013年までの年平均値の経年変化（ここでは、既知の周期的な自然要因（太陽活動、QBOなど）と関連の高い変動成分を除去していない）。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

日本上空のオゾン全量の長期変化

国内3地点の地上観測データを用いたオゾン全量と長期的な変化傾向を図1-3-18に示す。

札幌、つくばと那覇共に1990年代半ばまでのオゾン全量の減少に対し、1990年代半ば以降の増加が見られるが、個別の観測地点については必ずしもEESCフィッティングが有効ではないため、EESCが最大となる1996年末を転換点とした折れ線フィッティングにより長期変化傾向を示した。

2013年のオゾン全量は、1979年と比べて、通年では札幌で2.1%少なく、那覇で4.1%多く、いずれも統計的に有意（95%の信頼区間の範囲が全て減少あるいは増加）であった（表1-3-1）。季節別にみると、那覇では冬季を除いて有意に増加している。

1980年代のオゾン全量は、札幌とつくばで通年で有意に減少しており、緯度の高い地点

ほど減少の割合が大きい（表1-3-2）。季節別にみると、札幌は全ての季節で有意に減少し、冬季と春季に減少の割合が大きく、つくばは冬季で有意に減少している。

1997年以降の変化傾向（表1-3-3）をみると、3地点ともに通年で有意な増加がみられ、札幌と那覇でその割合が大きかった。季節別にみると、札幌の秋季、つくばの冬季を除いた季節と、那覇の全ての季節で有意に増加している。

ただし、北半球中緯度の増加傾向は、大気の流れに関係した力学的要因が寄与している可能性*があり、成層圏の塩素量の減少だけを変化要因とみることはできない。また、対流圏オゾンも増加傾向にあり**、その寄与の可能性も考えられる。

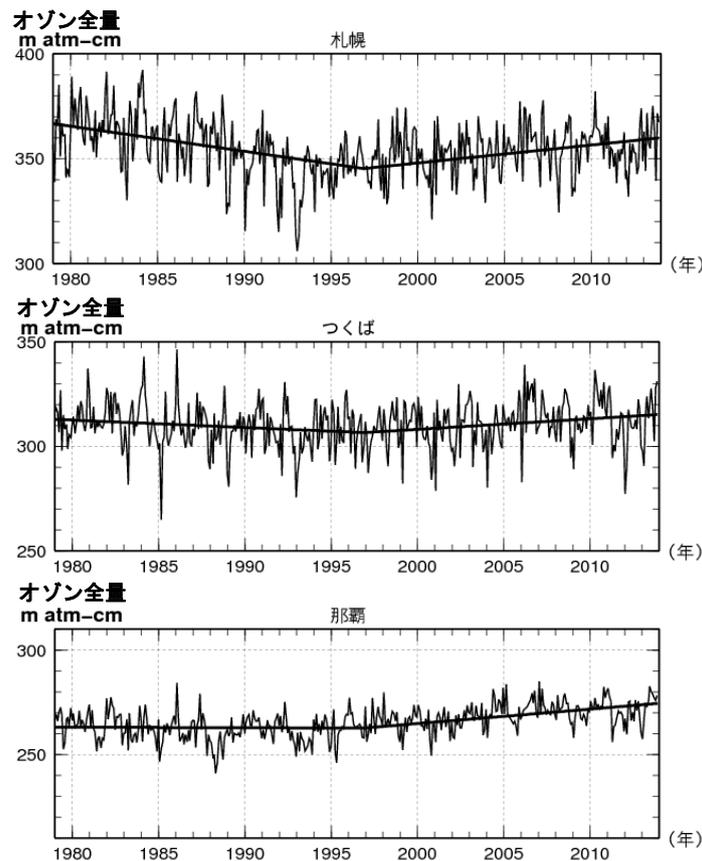


図1-3-18 日本上空のオゾン全量の長期変化傾向

国内のオゾン全量観測による1979年以降のオゾン全量(m atm-cm)。実線は、太陽活動など既知の周期的な自然要因と相関の高い変動成分を除去した値である。直線は、3地点とも折れ線フィッティングによる直線を示す。上から、札幌、つくば、那覇のデータ。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

* オゾン層破壊物質（ODS）の放出量を1980年レベルで一定に保った条件での成層圏モデル計算でも、1990年代半ば以降に北半球中緯度のオゾン量の増加傾向が再現されており、力学的要因の寄与が指摘されている（Hadjinicolaou et al., 2005）。

** 日本の観測地点では近年、春季に対流圏オゾンが増加するという研究がある（Tanimoto, 2009）。

表 1-3-1 日本上空のオゾン全量長期変化傾向（2013 年の 1979 年に対する変化の割合）

	札幌	つくば	那覇
通年	-2.1 (-3.8 ~ -0.4)	0.6 (-1.1 ~ 2.3)	4.1 (2.9 ~ 5.3)
春	-1.9 (-5.7 ~ 1.9)	1.0 (-3.0 ~ 5.0)	3.8 (1.2 ~ 6.3)
夏	-1.0 (-3.5 ~ 1.6)	1.3 (-1.4 ~ 4.0)	5.2 (3.0 ~ 7.4)
秋	-2.1 (-4.8 ~ 0.6)	1.9 (-0.8 ~ 4.5)	5.6 (3.4 ~ 7.7)
冬	-2.7 (-7.0 ~ 1.5)	-1.6 (-5.9 ~ 2.6)	2.3 (-0.5 ~ 5.0)

2013 年オゾン全量の 1979 年に対する変化の割合（%）。カッコ内は、95%の信頼区間の範囲を示し、網かけしたものは、統計的に有意(信頼区間の範囲がすべて正か負)なものである。通年、春、夏、秋、冬は、それぞれ 1~12 月、3~5 月、6~8 月、9~11 月、12~2 月。3 地点とも折れ線フィッティングから求めた。
 (出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013 年）より

表1-3-2 日本上空のオゾン全量長期変化傾向（1980年代の変化の割合）

	札幌	つくば	那覇
通年	-3.3 ± 0.7	-1.1 ± 0.7	-0.1 ± 0.5
春	-4.0 ± 1.6	-1.6 ± 1.7	-0.7 ± 1.1
夏	-2.6 ± 1.1	-0.8 ± 1.1	0.7 ± 0.9
秋	-2.0 ± 1.1	-0.1 ± 1.1	0.5 ± 0.9
冬	-4.4 ± 1.8	-2.0 ± 1.8	-0.7 ± 1.2

折れ線フィッティングの前半部のトレンドから求めた3地点の1980年代の変化量（%/10年）。カッコ内は、95%の信頼区間の範囲を示し、網かけしたものは、統計的に有意(信頼区間の範囲がすべて正か負)なものである。通年、春、夏、秋、冬は、それぞれ1~12月、3~5月、6~8月、9~11月、12~2月。
 (出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013 年）より

表1-3-3 日本上空のオゾン全量の1997年以降の変化傾向

	札幌	つくば	那覇
通年	2.5 ± 0.8	1.7 ± 0.8	2.6 ± 0.5
春	3.4 ± 1.9	2.4 ± 1.9	3.1 ± 1.2
夏	2.3 ± 1.2	1.7 ± 1.2	2.4 ± 1.0
秋	0.8 ± 1.2	1.2 ± 1.2	2.8 ± 0.9
冬	3.5 ± 2.1	1.2 ± 2.0	2.2 ± 1.3

折れ線フィッティングにより求めた 1997 年以降の変化傾向（%/10 年）と 95%の信頼区間の範囲。網かけしたものは、統計的に有意(信頼区間の範囲がすべて正か負)なものである。通年、春、夏、秋、冬は、それぞれ 1~12 月、3~5 月、6~8 月、9~11 月、12~2 月。

(出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013 年）より

(b) 日本上空のオゾンの高度分布にみられるトレンド

日本上空のオゾンの高度別トレンド

日本上空のオゾン鉛直分布の長期変化傾向をみるため、2013年の成層圏のオゾン量の1979年に対する変化の割合（%）について鉛直分布を図1-3-19上段に示す。

2013年のオゾン量は、1979年と比べて上部成層圏（高度約35km以上）では札幌とつくばの高度35km（5hPa）以上、那覇の高度45km付近（1hPa付近）で有意に減少している。下部成層圏では、3地点ともに高度約25km（約20hPa）付近で有意に減少し、札幌では高度16km（100hPa）付近を除き有意な減少傾向がみられる。

オゾン全量に増加傾向が見られた1990年代後半以降の期間（1997～2013年）で算出した国内3地点におけるオゾンの高度別トレンドを図1-3-19下段に示す。

1997年以降の変化量は、上部成層圏では、札幌の高度35km以上で有意な減少傾向が、つくばの高度35km以上で有意な増加傾向がみられる。対流圏から下部成層圏では、3地点とも高度24km（30hPa）以下のほとんどの高度で有意な増加傾向がみられた。

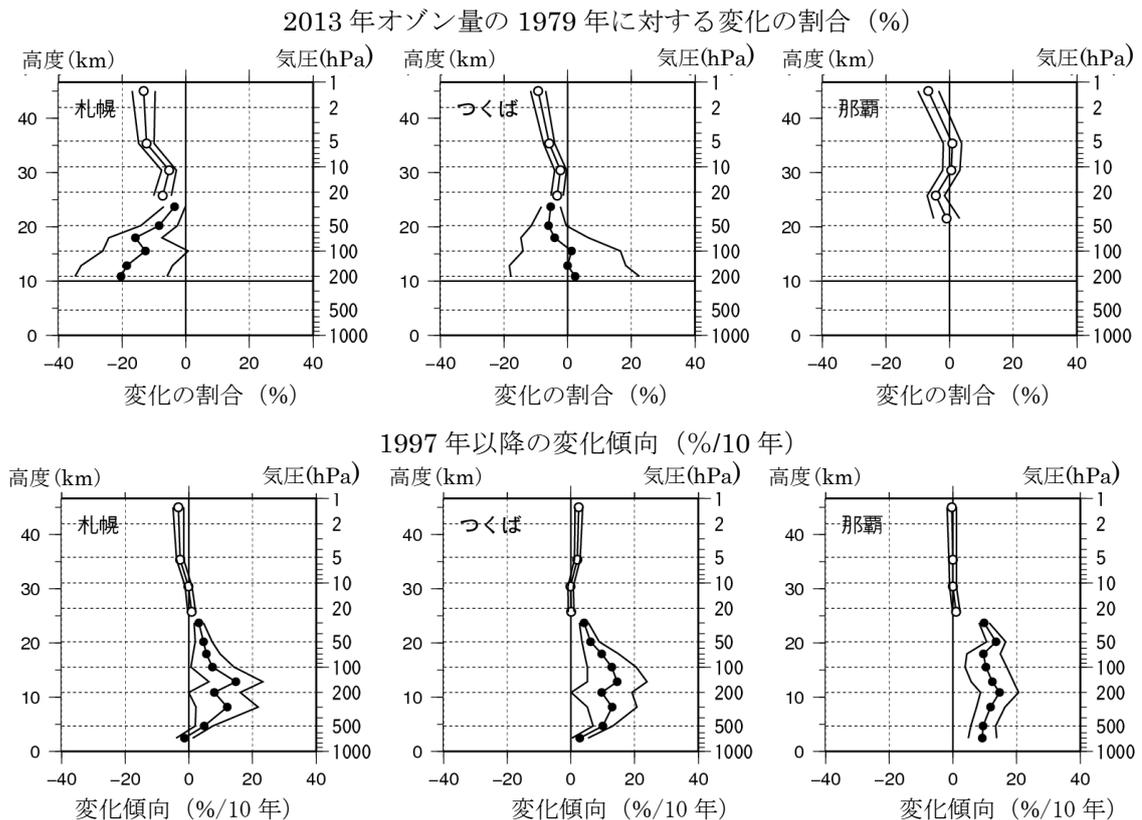


図 1-3-19 日本上空のオゾンの高度別トレンド

上段：2013年オゾン量の1979年に対する変化の割合（%）。下段：1997～2013年のデータから求めた変化傾向（%/10年）。●印はオゾンゾンデ観測データ、○印は反転観測データによる。外側の折線は95%信頼区間の範囲。那覇は、1989年より前のオゾンゾンデ観測データがないため、上段では反転観測の結果のみ示す。また、反転観測の約45kmの○印は、高度40km付近より高い気層について合計した量の変化傾向を表している。折れ線フィッティングによる長期変化傾向の解析により求めた。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）より

(c) 2013 年の日本上空のオゾン全量

気象庁で観測しているオゾン全量の2013年における月平均値の推移を図1-3-20に示す。2013年の状況については1994～2008年の平均値からの差が平均値算出期間の標準偏差以内のときを「並」、それより大きい時を「多い」、それより小さい時を「少ない」とした。

1994～2008年の平均値と比べると、2013年のオゾン全量の月平均値は、4地点ともに「並」か「多い」月が多かった。札幌とつくばでは、10月に「少ない」となり、ともに、その月として観測開始（札幌は1958年、つくばは1957年）以来最も少なかった。那覇では7～12月に多かった。南鳥島では、6月、8～9月に多く、それ以外の月は「並」だった。那覇の7～8月と12月はその月として観測開始（1974年）以来最も多かった。

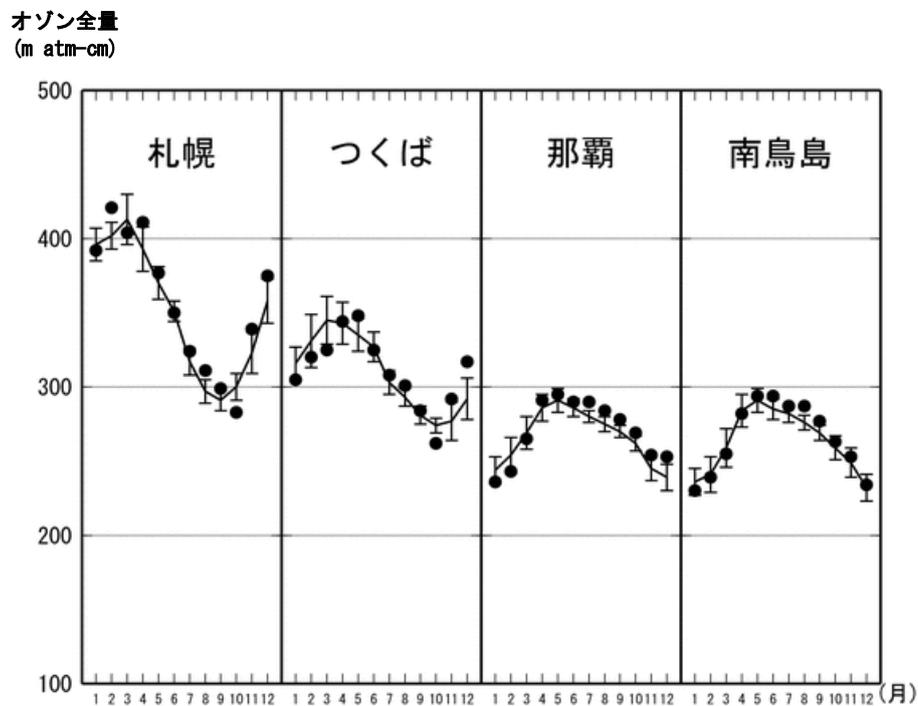


図 1-3-20 2013 年における月平均オゾン全量

国内4地点(札幌、つくば、那覇、南鳥島)における月平均オゾン全量の推移。●印は2013年の月平均値。折線(実線)は1994～2008年の平均値。縦線はその標準偏差。

(出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2013年)より

4. オゾン層の将来予測

4-1. CFC、ハロン等オゾン層破壊物質濃度とその推移

4-1-1. 対流圏でのオゾン層破壊物質濃度の推移

成層圏オゾンを破壊する CFC やハロン等の有機塩素・臭素化合物（ODS: オゾン層破壊物質）は、地上で放出された後、対流圏から成層圏に輸送され、主に太陽紫外線によって引き起こされる光化学反応を通して塩素原子や臭素原子又は一酸化塩素・一酸化臭素を生成する。これらの原子・分子が ClO_x サイクルや BrO_x サイクルと呼ばれる連鎖的なオゾン分解反応サイクルの担い手となり、オゾンの消失を促進しオゾン層の破壊を引き起こす。よって、成層圏中の塩素・臭素量の変化はオゾン層の長期的な変化を考える上での目安となる量である。

将来のオゾン層の変化予測を行う際に用いた地表面での有機塩素・臭素濃度の変化シナリオを図1-4-1に示す。地表面でのCFCなどの有機塩素濃度（ CCly 。太い破線）は1990年代前半にピークに達した後、緩やかに減少し、2030年頃に1980年レベルに戻る（図中の縦の矢印）。一方、ハロンなどの有機臭素化合物を考慮した有機塩素・臭素濃度（太い実線。図1-4-2と比較しやすいように有機塩素濃度 CCly に有機臭素濃度 CBry を60倍にした値を加えた総和として示す）では、1990年代半ばにピークを迎えた後、2010年頃までは有機塩素濃度の変化に比べて濃度の減少が緩やかなシナリオになっていることが分かる。これはハロン類の濃度増加が2000年過ぎまで続くと想定しているためである。その後、有機塩素・臭素濃度は有機塩素濃度とほぼ同様の減少傾向を示し、2030年代後半には1980年の濃度レベルに戻る（図中の縦の矢印）とのシナリオになっている。有機塩素・臭素濃度が1980年代のレベルに戻る時期が有機塩素濃度のみが1980年レベルに戻る時期に比べて10年程度遅くなっているのは、ハロン類の大気放出がCFCなどに比べてより長い期間継続すると想定したことが主な原因である。実際、多くのCFCの大気中濃度は1990年半ばには減少傾向に転じた（詳細はP92の図2-3-11を参照のこと）のに対し、主なハロン類の濃度は、ハロン-1211は2005年頃を過ぎて減少傾向に転じたが、ハロン-1301では現時点でも増加傾向が認められている（詳細はP93の図2-3-13を参照のこと）。

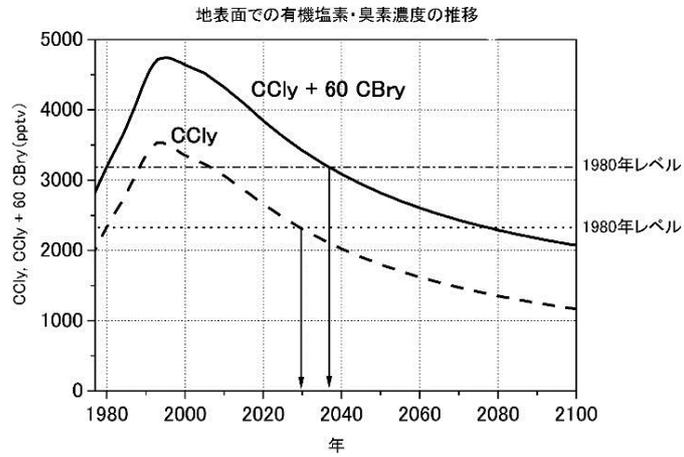


図 1-4-1 オゾン層の長期変化予測数値実験に用いた地表面の有機塩素・臭素濃度の変化シナリオ
 太い破線は CFC などの有機塩素 (CCl₄) のみの変化。太い実線は塩素に対する臭素のオゾン破壊効率が 60 倍と仮定して求めた有機塩素・臭素の変化 (CCl₄+60CBr₄)。細い点線及び一点鎖線は有機塩素及び有機塩素・臭素濃度の 1980 年レベル。(出典) 国立環境研究所秋吉英治主任研究員提供データ

4-1-2. 成層圏でのオゾン層破壊物質濃度の推移

成層圏オゾン層破壊に対する寄与の観点から成層圏に達した塩素・臭素の濃度を表す指標として、等価実効成層圏塩素（EESC。詳細は第1部3-1（a）（P13）脚注を参照のこと）が提唱されている。これは、臭素が関与するオゾン分解反応サイクルの効率が塩素のサイクルに比べて約60倍高いことを考慮して臭素量を塩素量に換算することで求められた成層圏での塩素・臭素濃度である。対流圏から成層圏へ輸送された塩素・臭素は、成層圏での大気の流れによって、地球規模の平均で3～7年程度かけて成層圏の様々な場所に運ばれる。したがって、成層圏中の塩素・臭素濃度は3～7年程度さかのぼった対流圏濃度を反映することになる。つまり、オゾン層における塩素・臭素濃度が1980年レベルに戻る時期は、地表面における有機塩素・臭素濃度が1980年レベルに戻る時期とは必ずしも一致しない。

これらの大気の輸送時間を考慮して推定された中緯度上空及び極域上空での EESC の推移の将来予測を図 1-4-2 に示す。EESC のピークは中緯度では 1990 年代半ばであるのに対し、極域では 2000 年頃になっていることが分かる。また、EESC が 1980 年レベルにまで減少するには、中緯度では 2050 年頃、極域では 2065 年頃までの期間を要することが分かる（最新の WMO の報告では、中緯度では 2046 年頃、極域では 2073 年頃とされている）（WMO, 2011）。

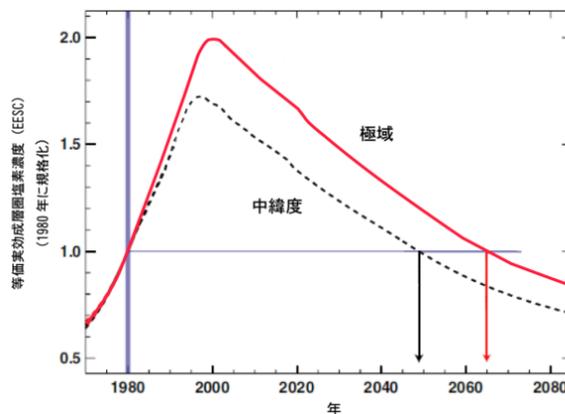


図 1-4-2 中緯度及び極域における等価実効成層圏塩素の推移

対流圏で放出された塩素・臭素が成層圏に輸送された後、中緯度成層圏並びに極域成層圏まで輸送される時間（成層圏大気滞留時間とも呼ばれる）を、それぞれ3年並びに6年として算出。それぞれの領域での EESC の推移は 1980 年の値との相対値の推移として示されている。

（出典）Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006（WMO, 2007）より作成

4-2. 温室効果ガス濃度の増加とオゾン層への影響

4-2-1. 温室効果ガス濃度の推移

オゾン層破壊が塩素・臭素濃度のみで決定されるのであれば、オゾン層の破壊は図 1-4-2 の曲線に対応して、中緯度では 1990 年代後半をピークに、また極域では 2000 年代前半をピークに減少しはじめ、中緯度では 2046 年頃に、また極域では 2073 年頃には 1980 年レベルまでオゾン層が回復することが期待される。しかし、成層圏の大気の組成は、オゾン層破壊物質だけでなく二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O) などの温室効果ガス (GHG) の濃度も 1980 年代に比べて変化している。そこで、WMO 科学評価パネルでは、想定されるオゾン層破壊物質や GHG の濃度変化シナリオの下でオゾン層の将来変化予測が行われた。将来予測には、気候変化を含む成層圏の力学過程、化学過程をモデル化した三次元化学気候モデルが用いられた。モデル予測に使用された有機塩素化合物 (CCly)、二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、一酸化二窒素 (N₂O) 濃度の推移シナリオの例を図 1-4-3 に示す。

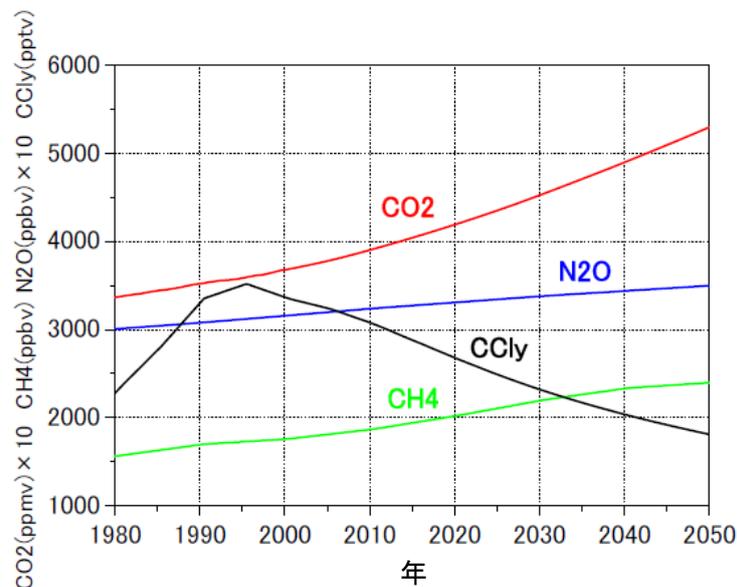


図 1-4-3 成層圏オゾンの長期変化の数値モデル実験を行う際に想定した有機塩素化合物や温室効果ガスの濃度の変化

(出典) CGER's Supercomputer Activity Report Vol14-2005 (2007) より

4-2-2. 成層圏での温室効果ガス濃度の増加とオゾン層

対流圏界面より上の成層圏では、オゾンによる太陽光吸収により加熱されるため、高度が高くなるに従い、気温が上昇する。成層圏において GHG は、対流圏とは異なって、赤外線宇宙に向けて放射することで加熱された成層圏大気を冷却する働きを持っている。GHG の中でも CO_2 は最も濃度が高く、成層圏における CO_2 の増加は成層圏気温の低下に最も大きな影響を及ぼす。成層圏気温の低下は、成層圏（特に上部成層圏）でのオゾン分解反応を減速させ、オゾン濃度の増加をもたらす。一方、極域成層圏では、気温の低下は極域成層圏雲の生成を促すことでオゾン分解反応を加速する可能性がある。なお、 CO_2 以外の GHG である CH_4 や N_2O は CO_2 に比べ濃度が低く、 CH_4 や N_2O の濃度の増減が成層圏気温に与える影響は小さい。しかし、 CH_4 や N_2O は成層圏での光化学反応によって、 HO_x や NO_x^* の生成に関与する。また CH_4 は、塩素原子を不活性化（塩化水素に変換）する役割も担っている。したがって、 CH_4 や N_2O の濃度の増減は、成層圏におけるオゾン分解反応サイクル (ClO_x 、 NO_x 、 HO_x サイクル**) の効率に影響を及ぼすと考えられている。今後の GHG の排出量の変化がオゾン層に与える影響について、経度方向に平均化された二次元モデルを用いた数値実験からは、北半球中緯度では、 N_2O の増加はオゾン層を破壊し回復を遅らせる方向に、また CH_4 の増加はオゾン層の回復を早める方向に、さらに CO_2 の増加はオゾン層の回復を早める方向に働くことが示された (Chipperfield と Feng, 2003 及び WMO, 2007)。

* HO_x や NO_x の定義 (説明) については、第 1 部参考資料 1 (本文 P50) を参照のこと。

** ClO_x 、 NO_x 及び HO_x サイクルについては、同じく第 1 部参考資料 1 (本文 P50) を参照のこと。

4-3. 化学気候モデルを用いたオゾン層の将来変化予測

成層圏のオゾン濃度や分布は、着目する領域において化学反応によって生成・消失するオゾン量と、他の領域からその領域に輸送されてくるオゾン量並びに他の領域に輸送されるオゾン量（オゾンの輸送量）に依存する（詳細は第 1 部 1-1（P7）を参照のこと）。

オゾンの生成並びに消滅に関わる化学反応の起こりやすさは、気温に依存する。一方、成層圏ではオゾンの太陽光吸収が主要な熱源になっており、オゾン濃度の変化は気温の変化につながる。さらに、オゾンの輸送量も成層圏の気温分布と相互に関係している。

そこで、成層圏での化学過程（オゾンの生成や消失）、物理過程（オゾンの輸送）、並びに放射過程（放射を通じた加熱・冷却）の間の相互作用を含んだ「化学気候モデル」（詳細は第 1 部参考資料 10（P69～70）を参照のこと）と呼ばれる数値モデルを用いて、オゾン層の将来変化予測が行われている。

(a) 中緯度域のオゾン層の予測

中緯度域（北緯 35° ～北緯 60° 及び南緯 35° ～南緯 60° ）での年平均・緯度平均したオゾン全量の将来予測について、緯度帯（北半球中緯度：北緯 35° ～北緯 60° 、南半球中緯度：南緯 35° ～南緯 60° ）ごとのオゾン全量の推移を図 1-4-4 に示す。

中緯度域のオゾン全量の長期変化には南北両半球で類似の傾向（2000 年過ぎに最も低いレベルに達した後、増加傾向に転じる）がみられる。しかしながら、オゾン全量が 1960 年レベル（人為起源のオゾン層破壊物質による大規模なオゾン層破壊が起こる前のレベル）に回復する時期は半球間で異なっており、北半球では、2030 年頃に、南半球では、2055 年頃と予測されている。オゾン全量が 1960 年レベルに回復する時期が北半球に比べて南半球で遅くなるのは、オゾンが大きく破壊された南極域の成層圏の空気塊が毎年春に南半球中緯度域に移動する影響を受けるためである。なお数値モデル予測によれば、南北両半球とも中緯度域でのオゾン全量は 21 世紀後半には 1960 年レベルを超える見通しである。このような予測結果となるのは、EESC の減少の影響に加え、GHG（特に CO₂）の増加による成層圏気温の低下（オゾン分解反応の減速）とブリューワ・ドブソン循環（詳細は第 1 部 1-1（P8～9）を参照のこと）の強化（オゾンを多く含む空気塊の輸送の増加。詳細は第 1 部 4-4（a）（P47）を参照のこと）によるものと考えられている。図 1-4-4 の破線は、オゾン層破壊物質（ODS）の放出量を 1960 年レベルに固定した条件で、GHG の増加の影響のみによるオゾン全量の変化の予測を示す。GHG の増加によってオゾン全量は 21 世紀末に向かって増加する。また、南半球中緯度では、実線と破線が 21 世紀末になってようやく近づいてくることから、この頃にオゾン全量が ODS の影響を受けなくなることがわかる。

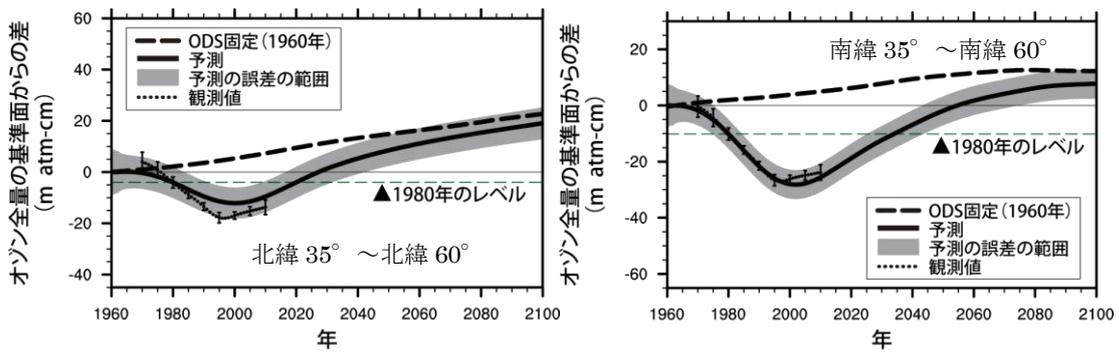


図 1-4-4 中緯度域におけるオゾン全量の推移予測

1960年を基準としたオゾン全量の推移の予測。黒点は観測値で、縦線はその標準偏差。太い実線は9つの化学気候モデルによる計算結果の平均であり、薄い網掛け部分は95%信頼区間を示す。太い破線はODSを1960年レベルに固定したものであり、ODSの放出量の変化の影響がない、GHGの増加の影響のみによるオゾン全量の変化の予測を示す。横軸に平行な破線はオゾンホールが顕著に現れ始めた年である1980年のレベルを示している。

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

(b) 極域オゾン層の予測

図1-4-5に北極域（北緯60°～北緯90°）及び南極域（南緯60°～南緯90°）のオゾン全量の推移を示す。

極域で予測されるオゾン全量の推移の傾向は北極域と南極域で類似しており、中緯度域のオゾン全量の推移と同様、2000年頃に極小を迎えたあとは、増加に転じ、21世紀末まで増加傾向が続くと予想されている。一方、北極域と南極域を比較すると、オゾン全量が1980年レベルに回復する時期や21世紀末のオゾン全量に違いがある。1980年レベルに回復する時期は、北極域では2020年から2035年の間と予測されるのに対し、南極域では21世紀中頃以降と予測されている。また、21世紀末のオゾン全量は、北極域では1960年レベルを超えているのに対し、南極域では1960年とほぼ同じレベルである。この違いは、GHGの増加によって引き起こされるブリューワ・ドブソン循環の強化（詳細は第1部4-4(a)(P47)を参照のこと）に伴う極域へのオゾンの輸送量の違いによるものと考えられている。図1-4-5の破線で示されるように、北極域ではGHGの増加に伴ってオゾン全量が増加していくのに対し、南極域ではわずかに増加するにとどまっている。また南極域では、今世紀末に近づいても実線と破線が十分に近づかないことから、この頃になってもオゾン全量はODSの影響を受けることが予想される。

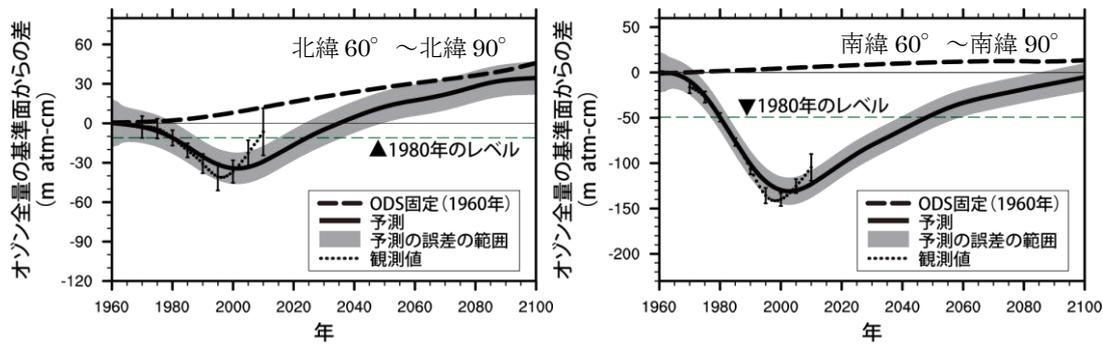


図 1-4-5 北極域及び南極域におけるオゾン全量の推移予測

1960年のオゾン全量を基準とした場合の推移の予測。左図は北極域の3月、右図は南極域の10月を示す。黒点は観測値で、縦線はその標準偏差。太い実線は9つの化学気候モデルによる計算結果の平均であり、薄い網掛け部分は95%信頼区間を示す。太い破線はODSを1960年レベルに固定したものであり、ODSの放出量の変化の影響がない、GHGの増加の影響のみによるオゾン全量の変化の予測を示す。横軸に平行な破線はオゾンホールが顕著に現れ始めた年である1980年のレベルを示している。

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

（c）低緯度域のオゾン層の予測

一方、低緯度域（南緯25°～北緯25°）で予測されるオゾン全量の長期的な変化の様子は、中緯度域や極域と異なっている（図1-4-6）。すなわち、オゾン全量は2000年過ぎに増加傾向に転じ、2060年頃に1980年レベルに回復し最大となるが、その後21世紀末まで再び減少すると予測されている。また、低緯度域でのオゾン全量は21世紀を通して1960年レベルよりも少ないままである。低緯度域で見られる21世紀半ば以降のオゾン全量の推移（再減少）は、上部並びに下部成層圏での異なる振る舞いの結果と考えられている。すなわち、EESCの減少の影響並びにGHGの増加による成層圏気温の低下（オゾン分解反応の減速）による上部成層圏でのオゾン濃度の増加の影響に対し、GHGの増加に伴ってオゾン濃度の低い対流圏大気の輸送が強化されることによる下部成層圏でのオゾン濃度の減少の影響が21世紀後半には勝るためと考えられている。GHG増加のこの効果は、ODS変化の影響のない計算（図中の破線）によって確認することができる。

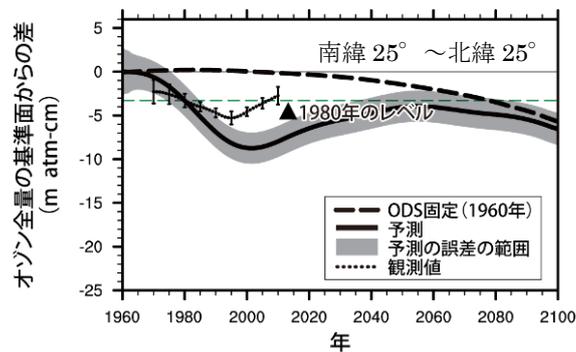


図 1-4-6 低緯度域におけるオゾン全量の推移予測

1960 年のオゾン全量を基準とした場合の推移の予測。黒点は観測値で、縦線はその標準偏差。太い実線は 9 つの化学気候モデルによる計算結果の平均であり、薄い網掛け部分は 95%信頼区間を示す。太い破線は ODS を 1960 年レベルに固定したものであり、ODS の放出量の変化の影響がない、GHG の増加の影響のみによるオゾン全量の変化の予測を示す。横軸に平行な破線はオゾンホールが顕著に現れ始めた年である 1980 年のレベルを示している。

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

4-4. オゾン層破壊と気候変化の相互作用

オゾン層破壊と気候変化は相互（オゾン層変化が気候に、気候変化がオゾン層）に影響を及ぼしあうと考えられる。しかしながら、化学、放射及び大気循環パターンの変化を介して引き起こされるオゾン層破壊と気候変化の相互作用は複雑であり、そのメカニズムはまだ十分に解明されているとは言い難い（WMO, 2011、UNEP-EEAP, 2011）。

(a) 気候変化が成層圏過程に及ぼす影響

水蒸気（H₂O）も CO₂ などと同じく、放射を通して成層圏の気温に影響を及ぼす。また同時に、H₂O は HO_x の生成や極域成層圏雲をはじめとする成層圏エアロゾルの生成にも関与している。そのため、成層圏の水蒸気量の変化は将来のオゾン層の変化を考える上では重要である。近年の下部成層圏での水蒸気量の気球観測からは、北半球中緯度の下部成層圏 (<30km) で 1980～2000 年の期間に増加傾向があることが報告されている。なお、1990 年代半ば以降の衛星観測からは、明瞭な増加傾向は認められていない。一方、2000 年から 2001 年にかけて中緯度並びに熱帯の成層圏での水蒸気量の急激な減少が気球観測並びに衛星観測によって観測されている。成層圏水蒸気濃度の過去の変動のメカニズムはまだ十分に理解されておらず、将来の気候変化に伴う水蒸気の変化の予測は容易ではない。

GHG の増加は大規模な成層圏大気の循環に影響を与えることが指摘されている。気候モデル*並びに成層圏化学気候モデル計算からは、GHG の増加によりブリューワ・ドブソン循環（詳細は第 1 部 1-1（P8～9）を参照のこと）が強まると予測されている。このような循環の強化が起こると、オゾン全量が熱帯で減少し、その他の緯度帯で増加するといった非常に重要な結果をもたらす（図 1-4-4、図 1-4-5 及び図 1-4-6（P44-46）参照）。循環の変化は今後のオゾン層の回復時期に影響を与えることが指摘されているものの、循環強化を引き起こすメカニズムはまだ解明されておらず、循環が強まっているという事実も観測されていない（WMO, 2011、Engel et al., 2009）。

(b) オゾン層の変化が対流圏気候に及ぼす影響

オゾン層のこれまでの長期的な変化の中で最も顕著な変化は、南極成層圏でのオゾンホール¹の形成である。よって、オゾン層の変化が対流圏気候に及ぼす影響に関しても南極域で最も顕著な影響が現れる可能性が高い。

南極の成層圏で春季にオゾン層が破壊されると、成層圏の気温が低下し、中緯度帯との気温較差が拡大して、ジェット気流（偏西風）が強くなる。その影響は 1～数ヶ月経って地表にも及ぶ可能性がある。Thompson と Solomon（2002）では、1969～2000 年の間に南極大陸の中央部から東側にかけて地表気温の低下傾向を、また、1979～2000 年の間に南極大陸周辺の西風が強まっている傾向を示した。このようなオゾン層と地表の風との関係

* IPCC の気候変化アセスメントなどに用いられているモデル。

は、化学気候モデルにおいても示されている（Son et al, 2008, Son et al., 2010）。

将来、南半球の地表の気温、風がどう変化するかについては、温室効果ガスの増加も影響する。IPCC の温暖化予測モデルや化学気候モデルによるシミュレーションにより、今後の温室効果ガスの増加によって南半球成層圏のほぼ全域で偏西風が強まることが予想されている。また、化学気候モデルは、今後、ODS 規制が功を奏してオゾン層が回復していった場合は、南極周辺の偏西風が弱まり、その弱まる領域が成層圏のみならず地表付近まで広がることを示唆している。さらに、このオゾン層回復の影響は、温室効果ガスの影響を上回る可能性も示されている（Polvani et al., 2011）。

南半球で、オゾン層の変化を介して地表まで達する偏西風の変化は、地表気温や海洋風成循環への直接的な影響をはじめ、様々な形で南半球の気候と関係している可能性がある。