

# 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(P48)を参照）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決まってくる。

### 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、オゾン層の存在が関

\* 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。

係している（詳細は第1部参考資料1（P48）を参照）。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。

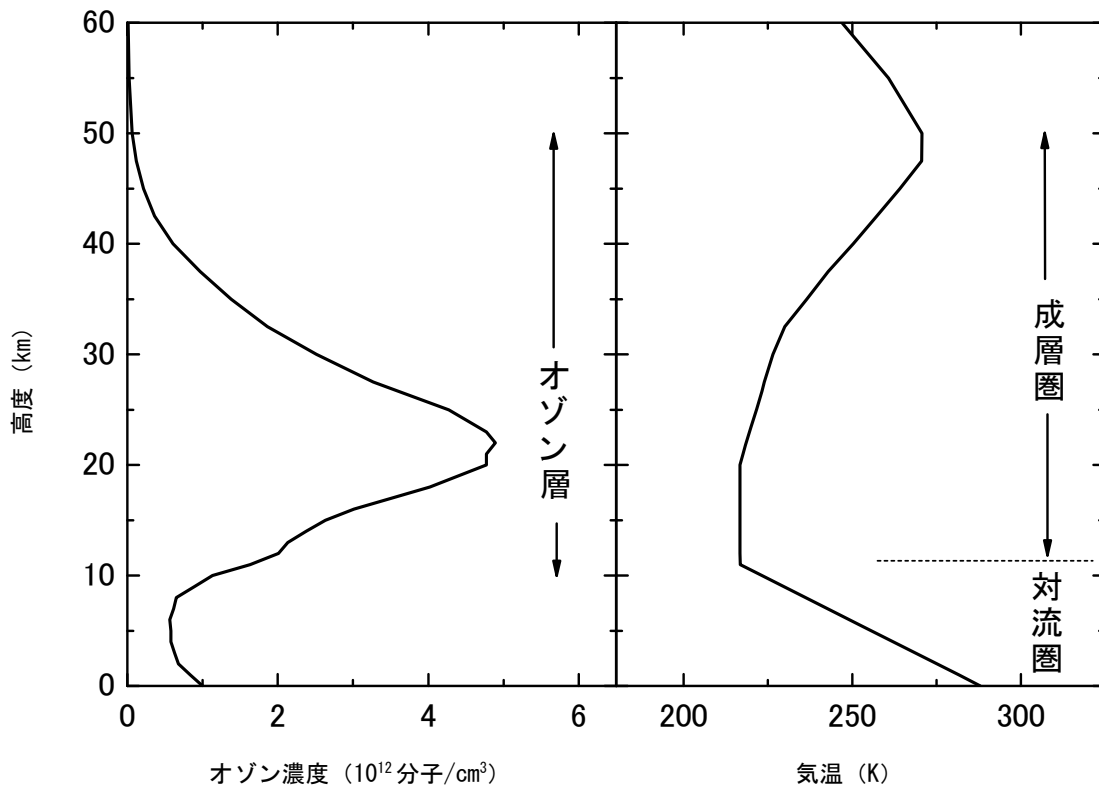


図1-1-1 オゾン濃度の高度分布（左図）及び気温の高度分布（右図）  
 （出典）US Standard Atmosphere（1976）をもとに作成

### 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。ところが図1-1-2あるいは図1-1-3などからもわかるように、オゾン全量は低緯度域で少なく中高緯度域で多くなっている。そのような緯度分布を作り出している原因は、大規模

\* 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。

な大気の輸送過程である。

大気は、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、半世紀以上昔に初めて推定された。提唱者の名前にちなんでこの循環はブリューワ・ドブソン循環と呼ばれる。成層圏内における下降流は、オゾンの豊富な低緯度成層圏の空気を中高緯度成層圏に輸送する主要なメカニズムであり、これによって低緯度から中高緯度にかけてのオゾン全量の増加が説明される。（詳細は第1部参考資料14（P76～77）を参照）。

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。

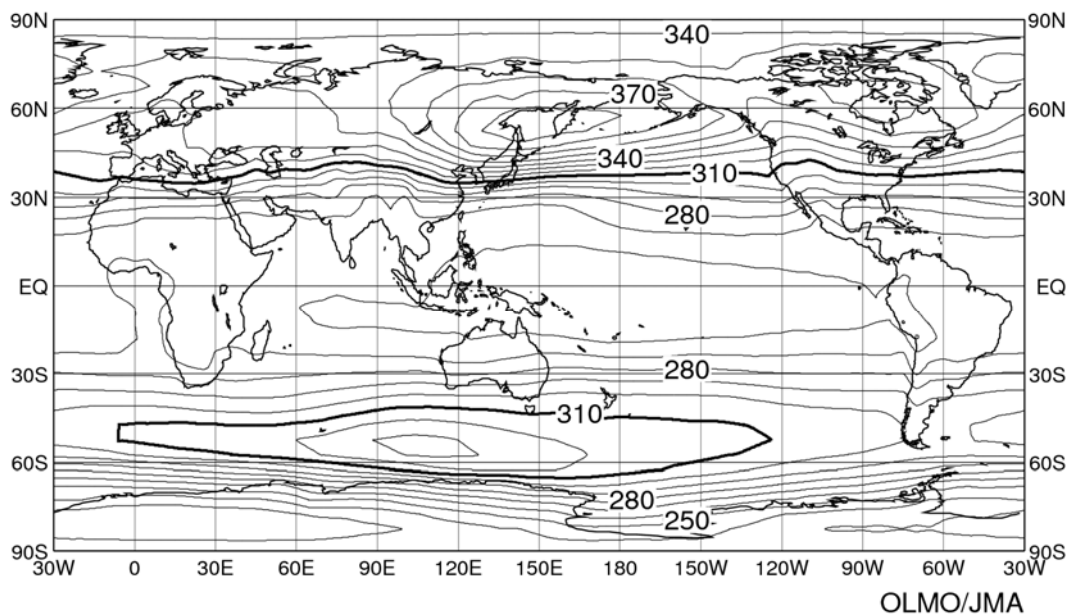


図 1-1-2 世界の年平均オゾン全量（1997～2006年の平均値）

単位は $\text{m atm}\cdot\text{cm}$ 、等値線間隔は $10 \text{ m atm}\cdot\text{cm}$ 。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、 $0^{\circ}\text{C}$ として地表に集めた層の厚さに相当する量である。 $\text{cm}$ 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 $\text{m atm}\cdot\text{cm}$ （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 $300 \text{ m atm}\cdot\text{cm}$ であるから、代表的なオゾン層の厚みは3mm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8km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。

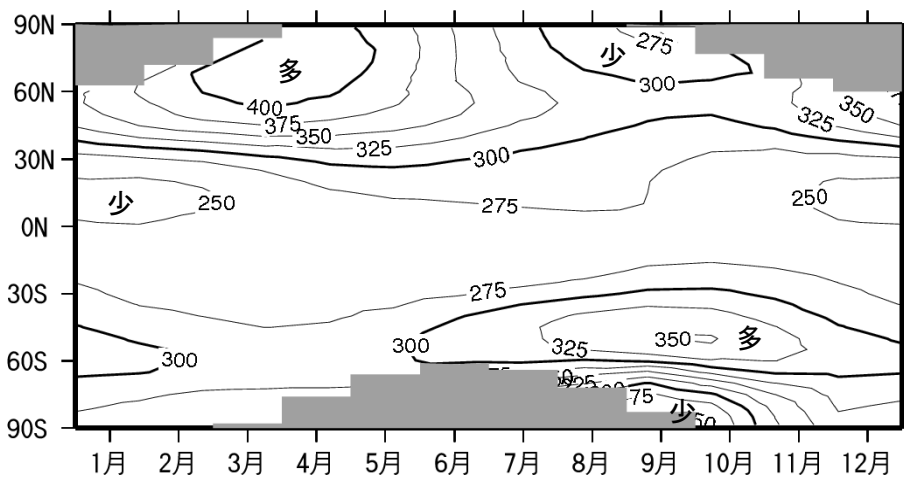


図 1-1-3 オゾン全量（1997～2006 年の平均値）の季節変動

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が変動するので、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の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、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。このような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 (P46~47) を参照)。

### 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( $\text{HO}_x$ )、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )、塩素酸化物( $\text{ClO}_x$ )、臭素酸化物( $\text{BrO}_x$ )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 (P48) を参照)。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 $\text{NO}_x$ が人為起源物質として問題になる。 $\text{ClO}_x$ と $\text{BrO}_x$ 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、 $\text{ClO}_x$ に対してはクロロフルオロカーボン(CFC)など、また $\text{BrO}_x$ 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。

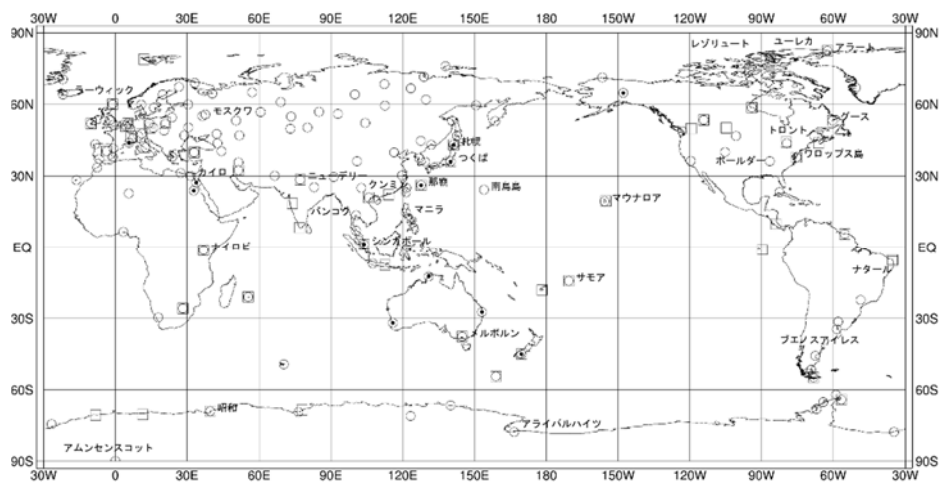


図 1-2-1 オゾン観測地点の分布(2011～2015年)

全量観測は 148 地点 (○印)、反転観測は 12 地点 (●印)、オゾンゾンデ観測は 55 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 (2015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) 2015 年のオゾン全量の状況

##### 世界のオゾン全量偏差(%)の分布(2015 年)

2015 年の世界のオゾン全量の分布を図 1-3-1（上図）に、オゾン全量偏差（%）の分布を図 1-3-1（下図）に示す。2015 年の世界の年平均オゾン全量の分布を、オゾン量の減少傾向が止まり、オゾン量がほぼ一定していた 1997～2006 年の平均値の分布と比較すると、ハドソン湾からグリーンランド南部、アイスランドにかけての年平均オゾン全量は平均値より 5%以上多く、一部の領域では 7.5%以上多かった。月毎にみると、この領域の 1～4 月のオゾン全量は平均値よりも 10%以上多かった。これは、大気循環の変動によって圏界面が例年より低かったことに対応していると考えられる。

また、3 月のスカンジナビア半島から東シベリアにかけてのオゾン全量は平均値よりも 5%以上少なかった。これは極域成層圏雲の発生によるオゾン層破壊が関連していた可能性がある。

低緯度域では、赤道付近から北では正偏差、それ以外の領域では負偏差の領域が帯状に広がっているが、顕著に偏差が大きい領域はみられなかった。このような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 年の平均値より少なく、一部で 10%以上少なかった。南半球高緯度の 10～12 月のオゾン全量は平均値より少なく、10 月には一部の領域では 40%以上も少なかった。これは、南極大陸上空の下部成層圏（高度約 20km）において  $-78^{\circ}\text{C}$  以下の低温域が例年より継続して広がり、オゾンの破壊を促進させる極域成層圏雲が広範囲に発生しやすかったことが考えられる。

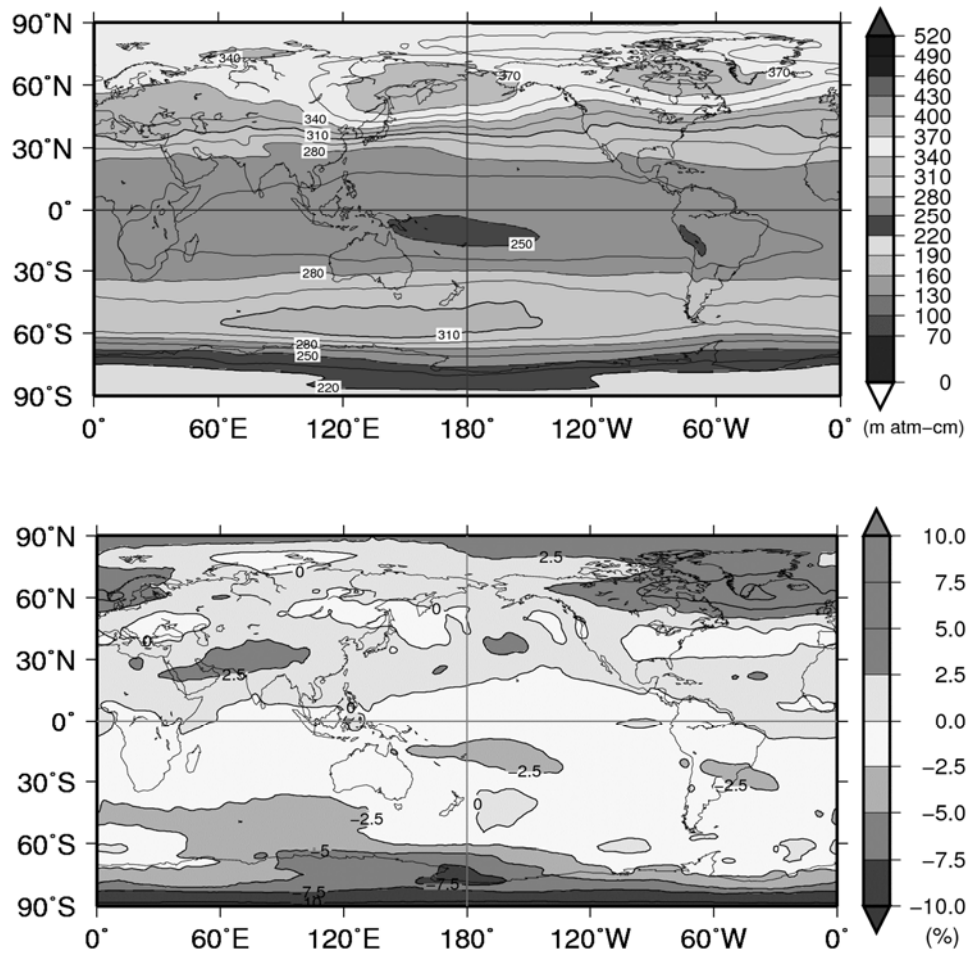


図 1-3-1 世界のオゾン全量（上）および偏差（下）の年平均分布図（2015年）

（上図）月平均オゾン全量（m atm-cm）の年平均分布図および（下図）月平均オゾン全量偏差（%）の年平均分布図。（上図）の等値線は15m atm-cm間隔（下図）の等値線は2.5%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（2015年）より

## (b) 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（成層圏エアロゾル）、ENSO（エルニーニョ／ラニーニャ現象）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、大気中のオゾン層破壊物質の濃度の変化にともなう変動成分と、未知の要因による変動成分が重なった時系列と関連づけて理解されている。この時系列からオゾンのトレンド（長期変化傾向）を求める。

オゾン量の長期的な変化はその特徴から、1970 年代及びそれ以前のオゾン量がほぼ一定していた状態、1979～1990 年代前半までのほぼ直線的な減少傾向、1990 年代後半の減少傾向の緩和、及び 2000 年代からの緩やかな増加傾向に分類できる。

### トレンドの評価方法及びその留意点

オゾン量の長期的な変化傾向を抽出するため、これまで EESC\*（Newman et al., 2007 : 等価実効成層圏塩素。巻末「用語解説」参照）の時系列（図 1-3-2）と関連づけた解析を採用していたが、このような解析は、オゾン量の長期変化傾向が EESC の変化曲線で規定され、他の変動要因の影響を排除してしまう欠点がある（WMO 2014）。

本報告書では、「オゾン層破壊の科学アセスメント 2014」で用いられている手法に準じて、既知の周期的な自然変動を除去したオゾン時系列データを用いて、1979 年 1 月から 1996 年 12 月の回帰直線によりオゾン量が減少した時期の変化傾向を求め、2000 年 1 月から最新年までの回帰直線で近年の変化傾向を求めた（図 1-3-3）。

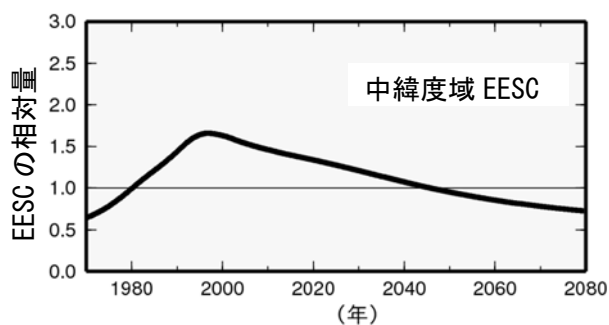


図1-3-2 等価実効成層圏塩素 (EESC) の経年変化

1980年を1とした相対的な値として示した。WMO（2014）と同様に、対流圏から成層圏に入ったオゾン層破壊物質が中緯度域まで塩素・臭素原子として到達するまでの時間を3年として算出。また、臭素原子のオゾン破壊効率を塩素原子の60倍とした。EESCの数値は米国航空宇宙局（NASA）から提供。（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015年）より

\* 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。

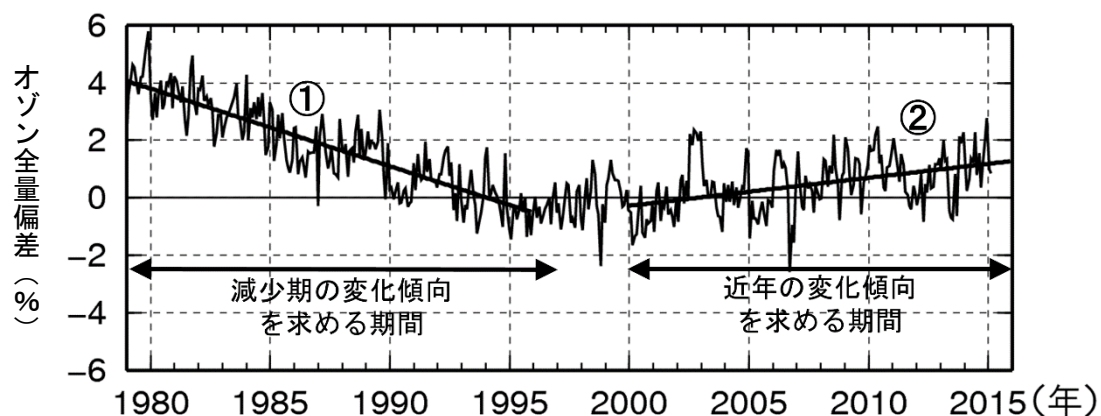


図1-3-3 オゾンの長期変化傾向の解析

長期変化傾向の解析を、世界のオゾン全量に適用した例。

実線は世界の地上観測によるオゾン全量偏差（％）で、既知の自然変動成分を除去している。比較の基準値は1994～2008年の平均値。直線は地上観測データの1979～1996年の回帰直線（①）と2000～2015年の回帰直線（②）。世界の地上観測点は世界オゾン・紫外線資料センター（WOUDC）のデータを用いた。（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015年）より

なお、本報告書において、月別平均値から季節変動および既知の自然変動による影響を除去した時系列データの回帰直線から長期変化傾向を算出した図表は下記のとおり。

- 図1-3-14下段                   【P29：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1-3-19                       【P35：日本上空のオゾン全量の長期変化傾向】
- 図1-3-20下段                   【P36：日本上空のオゾンの高度別トレンド】

本報告書では2000年以降のオゾン量の変化を「近年の変化傾向」として評価した。

第1部3-1(c) オゾン全量のトレンドの分布及び季節変動（P18～19）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12（P72～73）を参照。

図 1-3-4 に、気温・東西風速・南北風速データを同化した化学気候モデルで計算された北半球中緯度のオゾン全量の長期変化傾向を示す。EESC の増加が顕著であった 1996 年以前のオゾン全量の低下傾向は、モデルによる計算結果にも見られる。

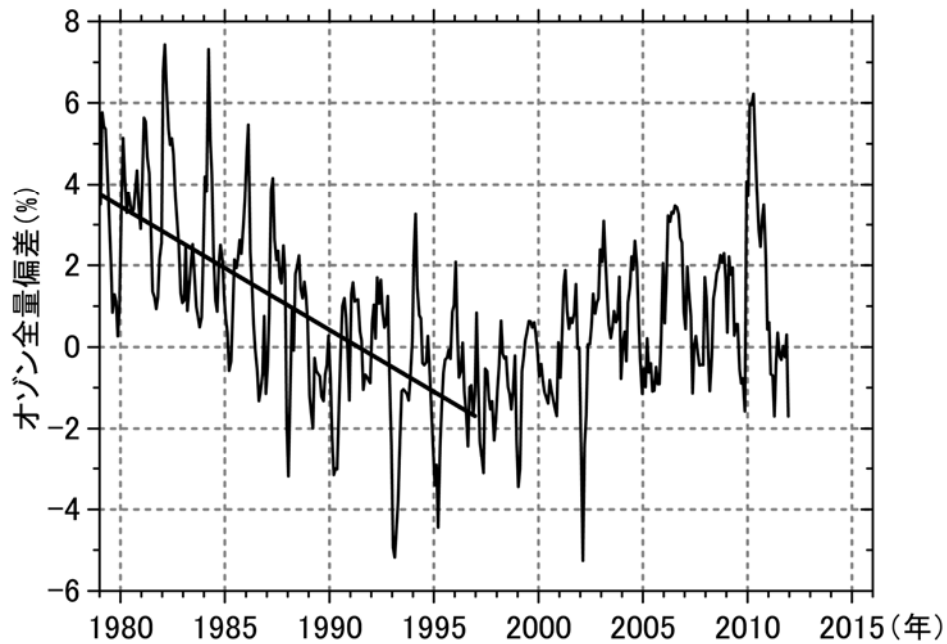


図 1-3-4 化学気候モデルで計算されたオゾンの長期変化傾向

長期変化傾向の解析を、化学気候モデルで計算されたオゾン全量に適用した例。実線は国立環境研究所の化学気候モデルの30-60°N平均のオゾン全量偏差 (%) で、既知の自然変動成分を除去している。比較の基準値は図1-3-3と同じく1994～2008年の平均値。直線は1979～1996年の回帰直線。

(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

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）で大きく減少した。近年のオゾン層の状況は、人為的なオゾン層破壊によりオゾン量が少なかった時期（1980 年代から 1990 年代前半）と同程度か僅かに増加しているが、依然として 1970 年代と比べて少ない状態が続いている。

観測されたデータによる緯度帯別オゾン全量の 1979～1996 年（左図）および 2000～2015 年（右図）の変化傾向（%）を図 1-3-5 に示す。

1979～1996 年の（左図）衛星観測（●印）では低緯度帯の一部（北緯 20 度～南緯 10 度）を除き統計的に有意な減少がみられ、地上観測も概ね同様の傾向を示している。特に南半球高緯度で減少傾向が大きい。これは南極オゾンホールに対応している。

2000～2015 年の変化傾向では、北半球においては北緯 10～70 度で有意な増加傾向がみられたが、中緯度（北緯 40～60 度）の地上観測データに着目すると変化傾向にばらつきがみられ、また一部の観測地点では減少傾向となっていた。

南半球では、南緯 60 度以南で有意な増加傾向がみられるが、その信頼区間は他の緯度帯と比べても幅があることから、オゾンホールの規模が年々変動している可能性がある。

なお、2000 年以降の世界全体のオゾン全量の増加傾向については、大気中のオゾン層破壊物質の減少と自然変動が影響していると考えられている。しかし、自然変動と比べてオゾン層破壊物質が及ぼすオゾン全量変化が小さいため、オゾン層破壊物質がオゾン全量に及ぼす影響を正確に見積もることは現状では難しい（WMO, 2014）。

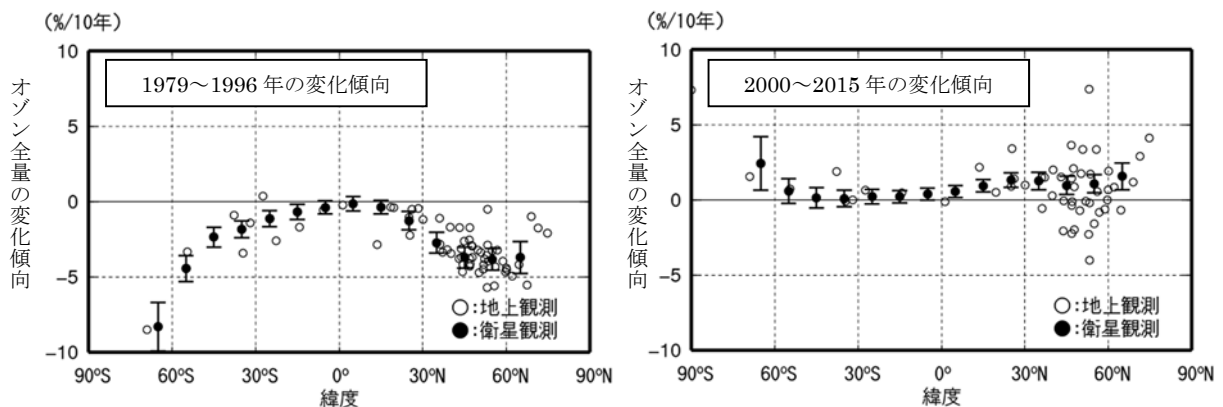


図 1-3-5 オゾン全量緯度別トレンド

オゾン全量の長期変化傾向を示す。左図は、1979～1996 年の変化傾向（%/10 年）、右図は 2000～2015 年の変化傾向（%/10 年）を示す。緯度帯（10 度）毎の衛星観測データ（●印）をプロットしている。衛星観測データの縦線は 95% 信頼区間の範囲。世界の地上観測地点（65 地点）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（2015 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、緯度別・月別オゾン全量の1979～1996年（上図）と2000～2015年（下図）の変化傾向（%/10年）を図1-3-6に示す。

1979～1996年では、年間を通して低緯度帯を除き、南北両半球のほとんどの領域で有意な減少傾向がみられた。北半球の高緯度では3～4月に、南半球の中・高緯度では8～12月にオゾン全量の減少の割合が大きく、極域での冬季から春季にかけてのオゾン層破壊の影響が比較的大きかったことを示している。これ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（P48～53）を参照）。

2000年以降では北半球高緯度の8～10月と南半球高緯度の1～4月等で増加傾向がみられる。一方、10～11月にはオゾンの減少傾向がみられる。

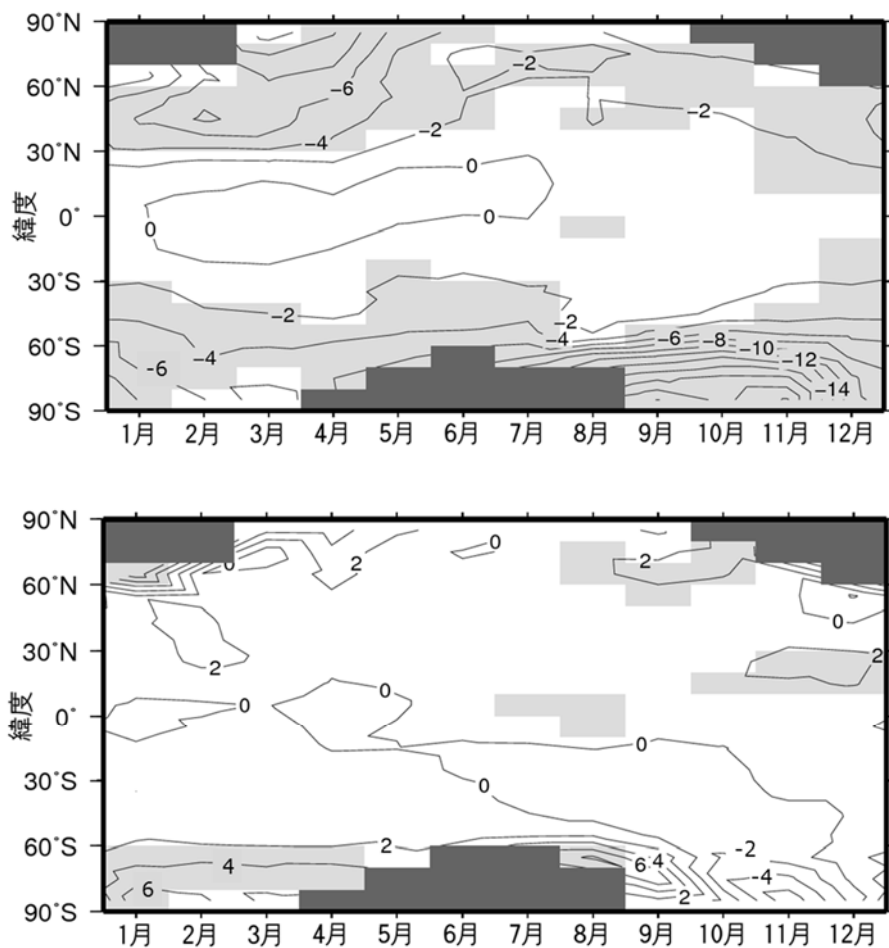


図 1-3-6 緯度別・月別オゾン全量の変化傾向（%/10年）

（上図）1979～1996年と（下図）2000～2015年のオゾン全量の変化傾向（%/10年）の月別分布。衛星観測による带状平均オゾン全量データを用いて求めたもの。等値線間隔は2%。薄い陰影部は95%信頼区間で有意に増加または減少している領域。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（2015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1-3-7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（P48）を参照）。

最近では、複数の衛星観測をつなげた長期間のデータにもとづいて、こういったトレンド解析がおこなわれている。一方最新の衛星観測結果から、これまでオゾンの日周変動成分は小さく無視できるとされていた中部・下部成層圏でも、オゾンの日周変動が明瞭に検出されている(第1部参考資料13（P74～75）を参照)。そういった成果を踏まえ、最新のオゾンアセスメントレポートでは、成層圏領域におけるオゾンの日変化がトレンド解析に及ぼす影響(さまざまな手法によるオゾン測定がその固有な観測時間によってバイアスを持ちうること)について述べられている(WMO, 2015)。(詳細は第1部参考資料13（P74～75）を参照)。

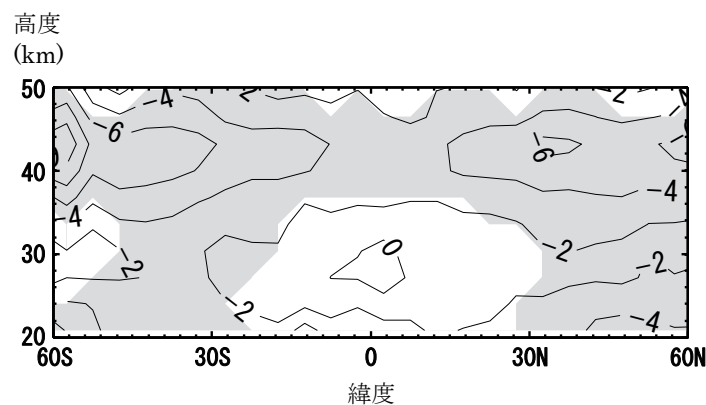


図 1-3-7 オゾン量の 1980 年代の変化傾向（%/10 年）の緯度・高度分布

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



## 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、2015 年のオゾン全量、オゾン全量の経年変化、及び高度別トレンドは以下のとおりである。

#### (a) 2015 年の南極域におけるオゾン全量

##### オゾンホールの規模の推移(衛星観測)

衛星観測データの日別値から求めた2015年の南極オゾンホールの規模の推移を図1-3-8に示す。

2015年の南極オゾンホールは、例年と同様に8月に発生し、その面積は過去10年間（2005~2014年）に比べ小さい規模で推移した後、9月初めに拡大した。その後、例年ならば縮小し始める9月中旬以降も拡大し続け、10月9日に今年の最大面積である2,780万km<sup>2</sup>（南極大陸の約2倍）まで広がった。10月中旬以降、過去10年間の最大面積と同程度か大きい状態を維持しながら縮小し、12月下旬に消滅した。オゾン欠損量は、10月10日に年最大値となる9,310万トン、最低オゾン全量は10月4日に年最低値である100m atm-cmとなった。

2015年の最大面積は、衛星観測を開始した1979年以降、1998年と同じく4番目の大きさであり、10月に観測された南極オゾンホールとしてはこれまでで最大\*であった。2015年のオゾン欠損量の年最大値は、観測開始以来6番目に大きい値であった。一方、2015年の最低オゾン全量は観測開始以来14番目に大きい値であったが、10月以降の最低オゾン全量は過去10年間と比較するとほぼ最低値を取りながら推移した。

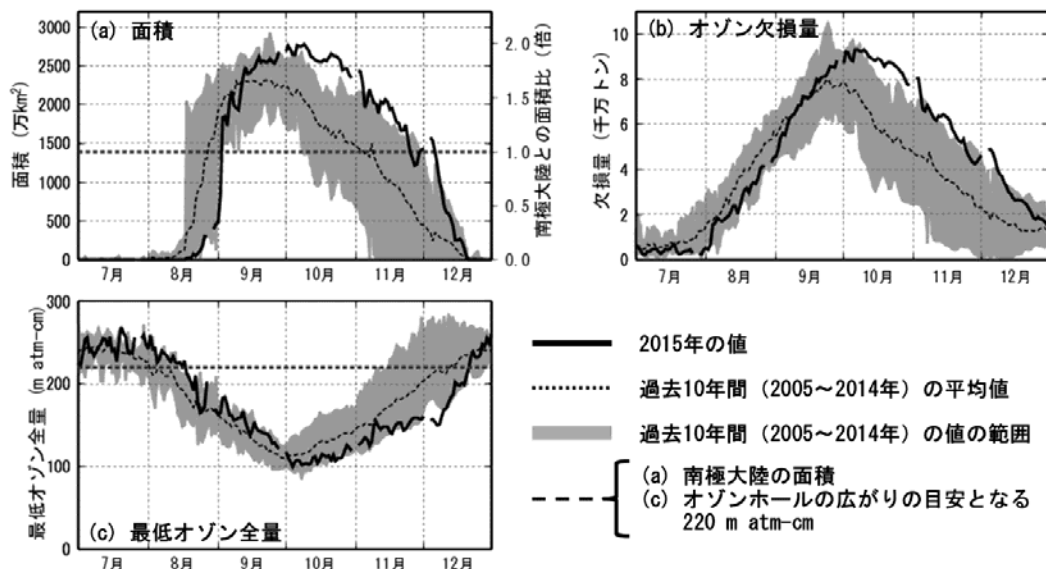


図 1-3-8 南極オゾンホールの規模の推移 (2015 年 7 月~2015 年 12 月)

実線は2015年、破線は過去10年間（2005~2014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（2015年）より

\*最近発表された研究では（Solomon et al., 2016）、9月まではオゾンホール回復の兆しが見えていたものの、10月以降、火山噴火の影響でオゾン破壊が進んだため、オゾンホールの規模拡大が見られたと説明されている。

### 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1-3-9に示す。

2015年のオゾンホール季節（8～12月）は、8～11月は1994～2008年の平均値と比較すると、同程度だったが、12月は平均値よりも少なかった。2015年のオゾンホール最大面積が観測開始以来4番目の大きさ、かつ10月以降の最低オゾン全量が過去10年間と比較してほぼ最低値を推移しているにもかかわらず、10～11月の月平均オゾン全量が平均値と同程度だったのは、オゾンホール内においても、昭和基地上空では顕著なオゾン減少域に入ることが少なかったためと考えられる。

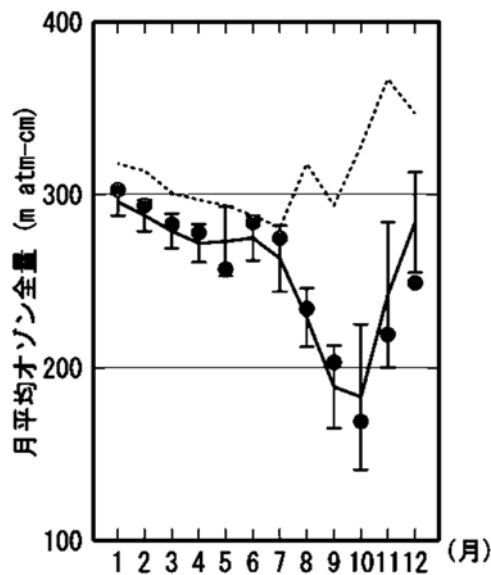


図 1-3-9 南極昭和基地における月平均オゾン全量 (2015 年)

●印は2015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（2015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1-3-10に示す。

8月中旬からオゾンホールが目安である 220m atm-cm を下回る日があり、9～10月は概ねこの値以下で推移した。10月7日に2015年の最小値である 140m atm-cm を記録した。11月以降、オゾン全量は短い周期で顕著な増減を繰り返した後、オゾンホール消滅前の12月中旬に急増して 300m atm-cm 程度となった。

9月下旬及び11月にみられた大きな変動は、南極オゾンホールが移動または変形して、昭和基地がオゾンホールの外に出たり内側に入ったりしたことに対応している。

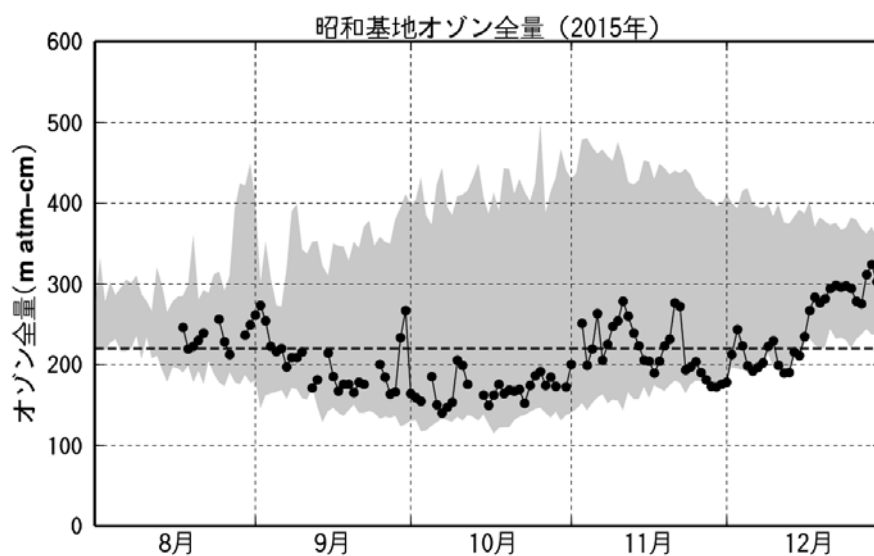


図 1-3-10 南極昭和基地における日別オゾン全量の推移（2015年8月～2015年12月）

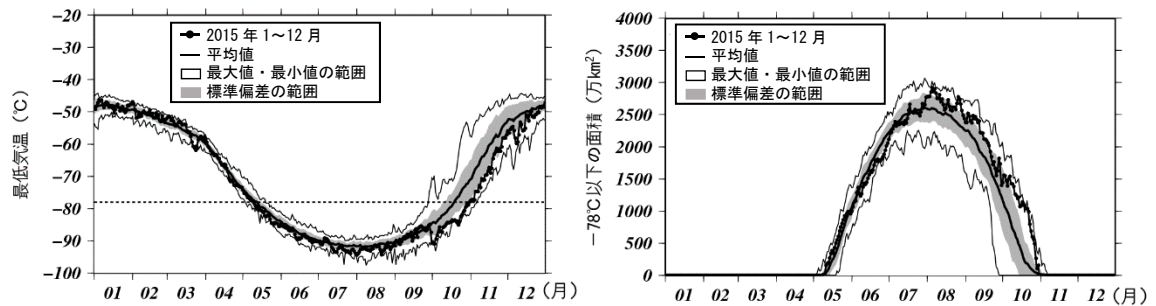
●は2015年の観測値（日代表値）。陰影部の上端と下端は観測開始（1961年）以来の最大及び最小値。横破線はオゾンホールの目安である220m atm-cmを示す。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015年）より

**（参考） 南極域上空の最低気温等の推移（2015 年）**

南極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、 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の低温状態が持続する場合に生成される。

図1-3-11に、2015年の南極域上空の下部成層圏（50hPa）の最低気温及び気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の面積の推移を示す。2015年の南極域の50hPaの日最低気温\*は、5月上旬から9月中旬まで $-78^{\circ}\text{C}$ 以下となり、9月下旬までは過去の平均値（1979～2014年）と同程度だった。その後、9月下旬に再び $-90^{\circ}\text{C}$ 近くまで下がった後、過去最低と同程度で推移し、 $-78^{\circ}\text{C}$ を上回ったのは例年より遅い10月下旬だった。 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の面積の推移を見ると、5月から7月中旬まで過去の平均値と同程度だったが、7月下旬以降は平均値よりも大きい規模を維持した。その後、9月中旬に過去の平均値程度に縮小したが、9月下旬以降は過去の平均値との差が再び大きくなり、10月上旬から過去の最大値程度で推移した後、10月下旬に消滅した。このことから、2015年の南極オゾンホールが例年ならば縮小し始める9月中旬以降も継続して発達した要因としては、南極域上空の下部成層圏において極渦が安定していたため、 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の低温域が例年より継続して広がったことが考えられる。



**図 1-3-11 南極域上空の下部成層圏の最低気温（左）及び気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積（右）の推移（2015 年 1 月～2015 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 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積の推移(右図)。●印は2015年の値を示す。陰影中の太実線は1979～2014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 $-78^{\circ}\text{C}$ 。

(出典) 気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2015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。

## （b）オゾン全量の経年変化

### オゾンホール<sup>1</sup>の経年変化（衛星データ）

最盛期（9～10月）のオゾンホール<sup>1</sup>の規模を表す3要素（年最大面積、最低オゾン全量、オゾン欠損量（破壊量））の極値、オゾンホール出現期間全体のオゾンホール<sup>1</sup>規模の指標としてのオゾンホール<sup>1</sup>面積の年積算値、ならびにオゾンホール<sup>1</sup>が消滅する時期（11～12月）のオゾンホール<sup>1</sup>縮小ペースの目安とした11月のオゾンホール<sup>1</sup>面積の平均値の経年変化（1979～2015年）を図1-3-12に示す。

南極オゾンホール<sup>1</sup>の規模は3要素のいずれにおいても1980年代から1990年代半ばにかけて急激に拡大したことが認められる。一方、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、その規模は依然として大きい状態が続いている。

オゾンホール<sup>1</sup>面積の年積算値においても、1980年代から1990年代半ばにかけて急激な増大が認められ、また1990年代後半以降は大きな年々変動はあるものの、しばしば大きな年積算値が観測されており、オゾンホール出現期間全体としてもオゾンホール<sup>1</sup>の規模は大きい状態が続いている。2015年のオゾンホール<sup>1</sup>面積年積算値は年最大面積が同じだった1998年と同程度であり、2015年のオゾン破壊が大規模であったことを物語っている。

11月のオゾンホール<sup>1</sup>面積の平均値は、1985年以降、年々変動が大きいものの、たびたび大きな値を示しており、特に1990年代後半以降は1990年代初め以前に比べ大きな値となっている。特に、2015年の11月のオゾンホール<sup>1</sup>面積の平均値はこれまでで最大であり、2015年のオゾンホール<sup>1</sup>の継続期間が例年に比べ長かったことに対応している。南極オゾンホール<sup>1</sup>の規模には、オゾン層破壊物質の濃度の変化にともなう長期的な変化に加えて気象要因による年々変動がみられ、2000年以降は年々変動が大きい傾向がある。このような年々変動は南極域上空の成層圏の極渦の強さや下部成層圏の気温などの大気の変動に対応している。

1990年代後半以降のオゾンホール<sup>1</sup>については、年々変動が大きいものの、いずれの指標からも、規模の大きい状態が続いていることが分かる。

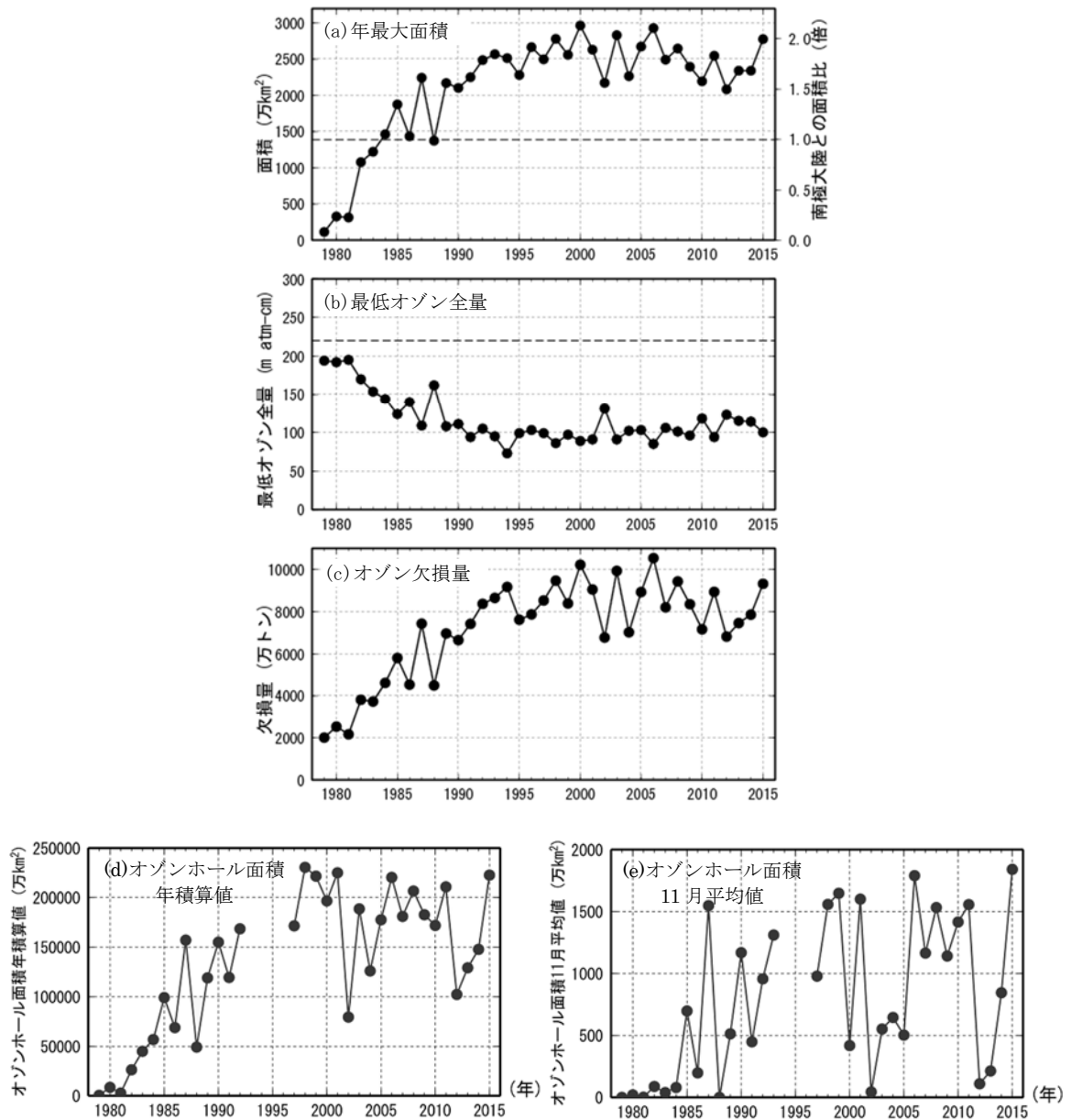


図 1-3-12 オゾンホールの規模の経年変化（1979～2015 年）

1979～2015年の(a)オゾンホール年最大面積、(b)最低オゾン全量、(c)オゾン欠損量の年極値、(d)オゾンホール面積の年積算値、(e)オゾンホール面積の11月平均値の経年変化。いずれの図もNASA提供の衛星データをもとに作成年積算値の1993～1996年と11月平均値の1994～1996年についてはデータが十分得られていないため、面積を求めていない。(a)横直線は南極大陸の面積、(b)横直線はオゾンホールの目安である220m atm-cmを表す。NASA提供の衛星データをもとに作成（主にTOMS/OMIデータを使用。1995年のみTOVSの高分解能赤外放射計のデータを使用）。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015年）より

**（参考） 南極オゾンホールの規模の定義**

オゾンホールの規模の目安として、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)

オゾンホール縁辺となることが多い南極昭和基地における9～12月の平均オゾン全量の経年変化を図1-3-13に示す。各月ともオゾン全量は、1980年頃から長期的に減少し、1990年代半ば以降は少ない状態が継続している。なお、2002年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。

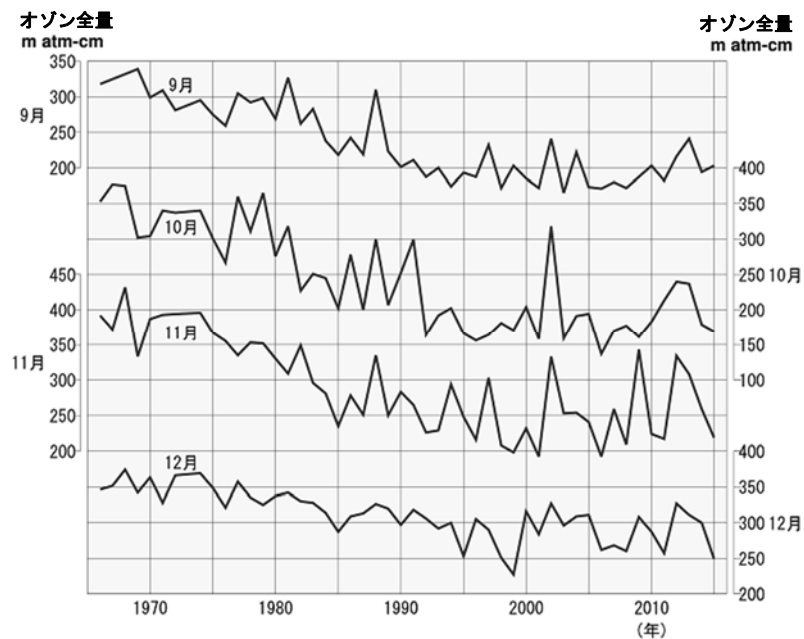


図 1-3-13 南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化（毎年9～12月）

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015年）より

### （c）高度分布のトレンド

南極昭和基地上空における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1-3-14に示す。

1970～1980年平均と最近5年（2011～2015年）平均の差（%）の高度分布（図上段）をみると、通年、春季ともに高度10～30km付近の全ての高度で1970～1980年平均よりも最近5年平均の方が低く、特に高度10～18km付近で顕著である。また、2000年以降の変化傾向（図下段）では、通年、高度10km（200hPa）～高度18km（70hPa）付近で有意な増加傾向が見られるが、春季では全ての高度において有意な増加傾向は見られなかった。このように、昭和基地上空のオゾンは、2000年以降一部高度で有意な増加傾向も見られるが、オゾン層破壊が起こる前と比べれば、依然として広い高度範囲で少ない状態が続いていると言える。また、春季において有意な増加傾向が見られないことから、昭和基地上空のオゾン量は大きく増減しているものの、2000年以降に発生したオゾンホールは依然として変わっていないと考えられる。



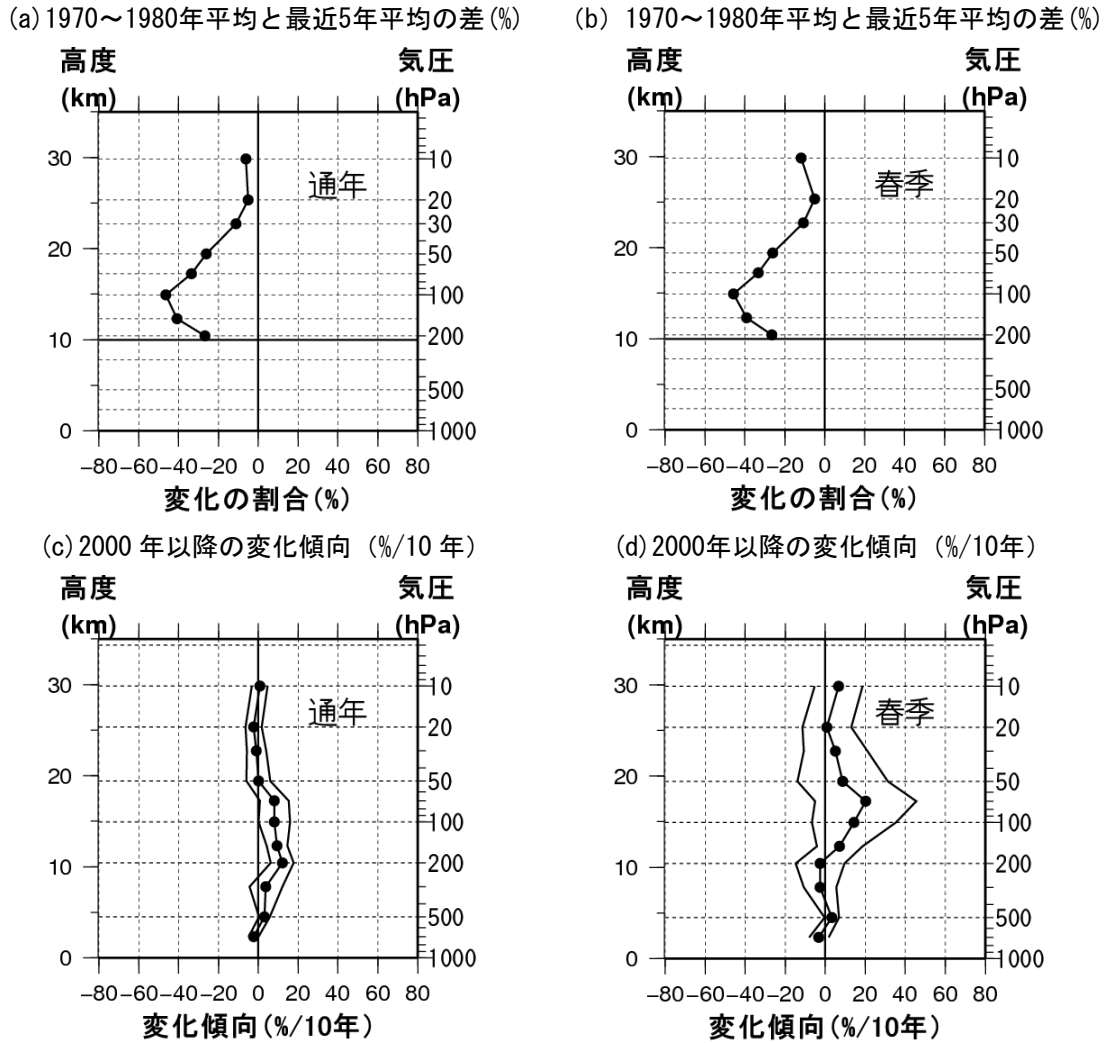


図1-3-14 南極昭和基地におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

●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、オゾン分圧の1970～1980年平均と最近5年間（2011～2015年）の平均との差（%）で、月別平均値から季節変動成分のみ除去したデータから求めた。下段は、2000年以降の変化傾向（%/10年）で、月別平均値から季節変動および既知の自然変動による影響を除去した時系列データの回帰直線から求めた。横軸は変化量、縦軸は高度。下段（c）（d）の外側の折線は95%信頼区間の範囲。左（a）（c）（通年）は月別値（1～12月）から、右（b）（d）が春季（9～11月）の値から求めた。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015年）より

### 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、2015 年のオゾン全量、及びオゾン層の推移は以下のとおりである。

#### (a) 2015 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、2015年春季の北半球高緯度では、3月にスカンジナビア半島から東シベリアにかけてオゾン全量負偏差域が広がっており、一部の領域では、1997～2006年の平均と比較して5%以上少なかった。

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。2014年7月～2015年6月の北極域の下部成層圏の最低気温、及び $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の面積の推移を図1-3-15に示す。

北極域の下部成層圏の最低気温の推移をみると、2014年12月中旬から $-78^{\circ}\text{C}$ 以下となり、12月下旬から1月中旬にかけて突然昇温により $-78^{\circ}\text{C}$ を上回った事を除くと、2015年2月中旬までの間は過去の平均値と同程度であった。2月下旬から4月中旬にかけての最低気温は過去の平均値よりも低かったが、その間に最低気温が $-78^{\circ}\text{C}$ を下回ったのは一時的であった。極域成層圏雲出現の目安である $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積は、2015年3月中旬以外の期間は平均値より小さく推移し、2014年12月下旬から2015年1月中旬にかけては $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域が消滅した。このことから、2014年冬季から2015年春季には、極域成層圏雲に関係したオゾン層の破壊が起きた可能性はあるが、2010年冬季から2011年春季のような大規模なオゾン層破壊は起こらなかった。

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。

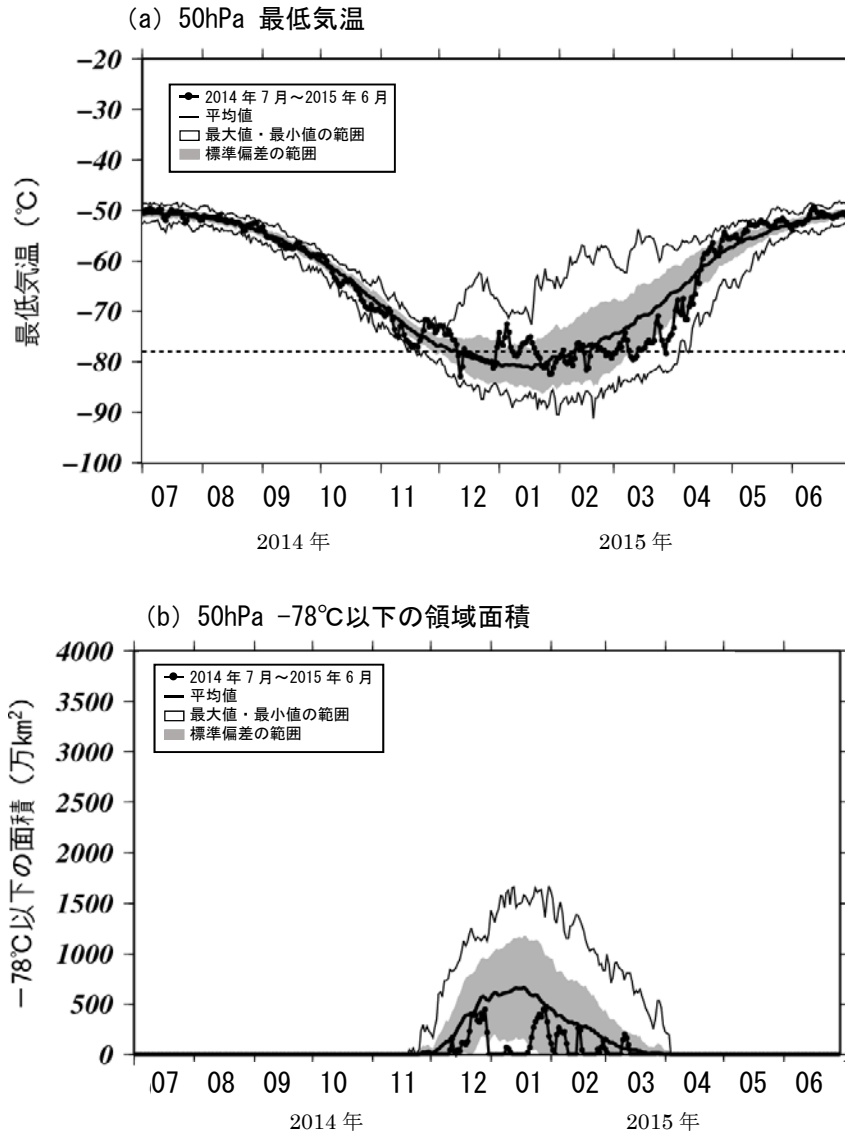


図 1-3-15 北極域上空の下部成層圏の最低気温（上）及び気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積（下）の推移（2014年7月～2015年6月）

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 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積の推移(下図)。●印は2014年7月～2015年6月の値を示す。陰影中の実線は7～12月は1979～2013年、1月～6月は1979～2014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。ただし、気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積の最小値は一年を通して $0\text{ km}^2$ である。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 $-78^{\circ}\text{C}$ 。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015年）より

### (b) 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見るために、北半球高緯度域の3月の月平均オゾン全量偏差を図1-3-16に示す。衛星観測（TOMSおよびOMI）データによると、1990年以降、データのない1995、1996年を除き、 $-20\text{ m atm-cm}$ を超える負偏差が24年のうち19回現れており、北半球高緯度域でのオゾン全量は1990年以前に比べ少なくなる年が多い。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データのない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 $-60\text{ m atm-cm}$ を超える規模であった。このうち1996年は、約 $-80\text{ m atm-cm}$ の負偏差がみられた。2015年の衛星観測値は $-20\text{ m atm-cm}$ 程度の負偏差となった。

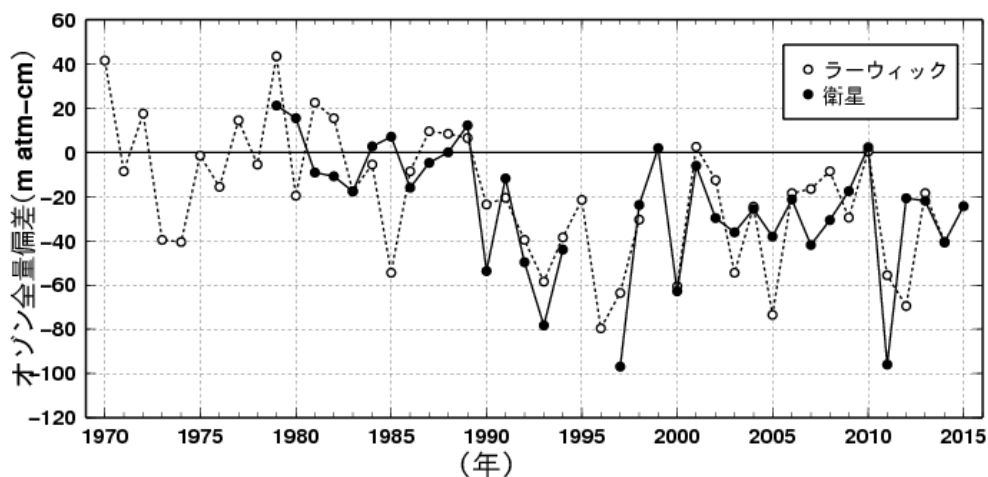


図 1-3-16 北半球高緯度域の3月のオゾン全量偏差の経年変化

●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（2015年）より

### 3-3. 我が国におけるオゾン層の状況

#### (a) 2015 年の日本上空の月別オゾン全量

気象庁で観測しているオゾン全量の2015年における月平均値の推移を図1-3-17に示す。2015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、2015年のオゾン全量の月平均値は、札幌で平均値を上回る月がたびたびみられた。つくばでは全体的に平均値に近かったが、2月と9月は「多く」、特に9月はその月として観測開始（1975年）以来2番目に大きい値。南鳥島では「多い」月が多かった。

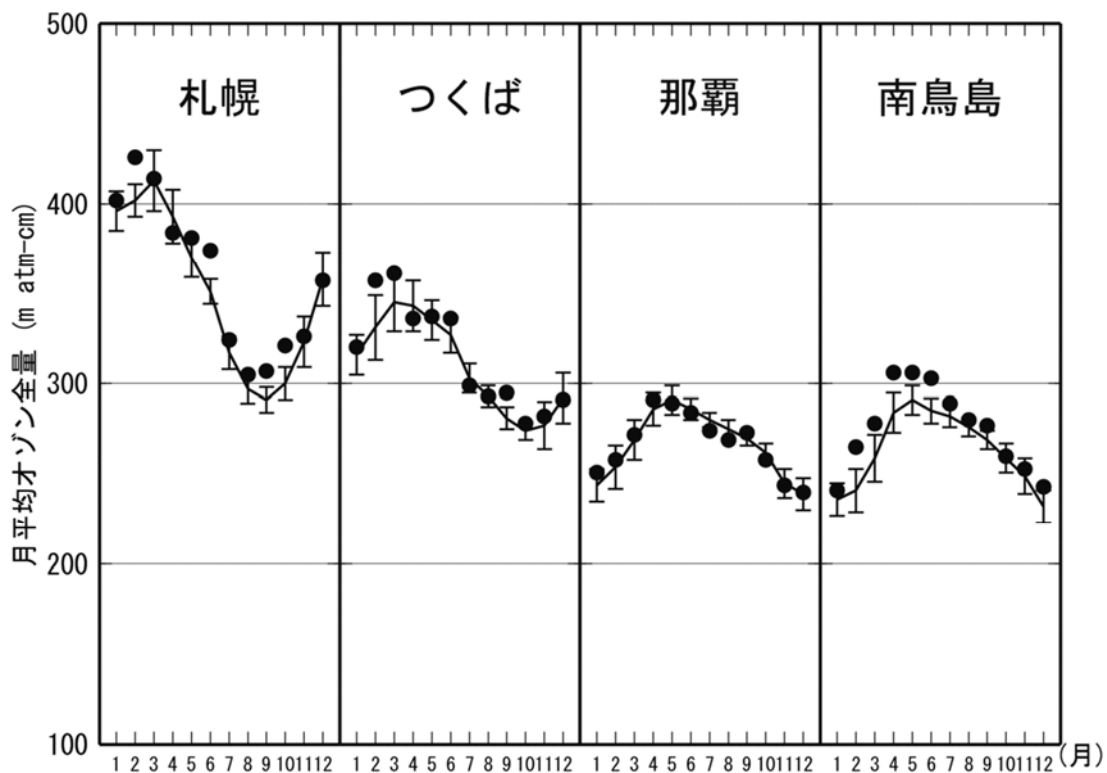


図 1-3-17 2015 年における月平均オゾン全量

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2015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(2015年)より

(b) 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1-3-18に示す。なお、この図は3-1 (b) 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P15を参照）。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1980年代から1990年代半ばまで減少した後、緩やかな増加傾向がみられる。つくばにおける最近の5年間の平均値は1970～1980年の平均値と比べ、同程度まで回復しているが、札幌に関しては、依然少ない状況にある。また、那覇と南鳥島では期間を通して緩やかな増加傾向が見られる。

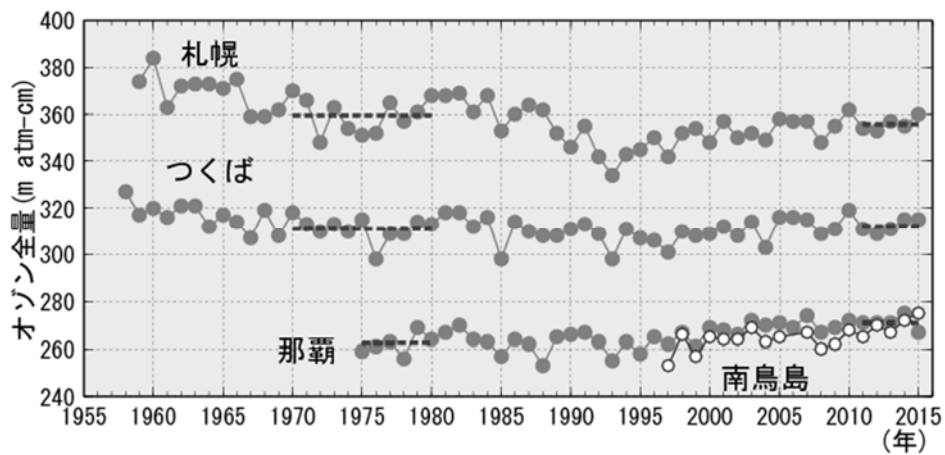


図 1-3-18 日本上空のオゾン全量の年平均値の経年変化（1958～2015年）

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2015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）と相関の高い変動成分を除去していない）。黒破線は1970～1980年平均値（那覇は1975～1980年）と最近5年間（2010～2015年）の平均値

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015年）より

### 日本上空のオゾン全量の長期変化

国内3地点（札幌、つくば、那覇）の地上観測データを用いたオゾン全量とオゾン層破壊が進んだとみられる1979～1996年までの期間と、僅かな増加がみられる2000年以降の期間の長期的な変化傾向を図1-3-19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、2000年代半ば以降の増加が見られる。

2000～2015年のオゾン全量は増加傾向を示しており、10年当たりの変化率は、札幌とつくばで+1.5%、那覇で+1.4%となり、有意な増加がみられる。

1979～1996年のオゾン全量は、減少傾向を示していた。特に、札幌とつくばでは有意に減少しており、10年当たりの変化率は、札幌で-4.1%、つくばで-1.2%となった。

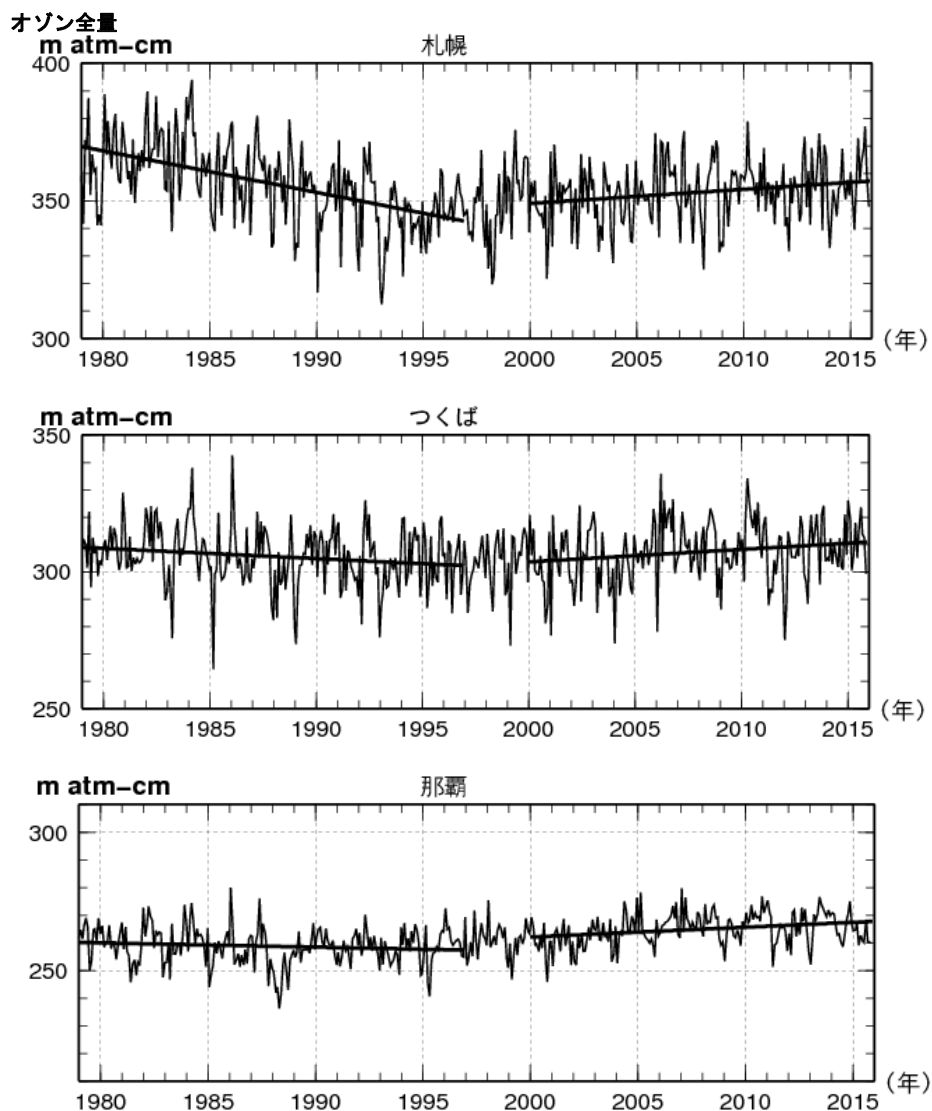


図1-3-19 日本上空のオゾン全量の長期変化傾向

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、1979～1996年及び2000～2015年の回帰直線を示す。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 (2015年) より

(c) 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、1970～1980年までの平均値と最近5年間（2011～2015年）との差（%）について鉛直分布を図1-3-20上段に示す。

札幌ではほぼ全ての高度でオゾン層破壊前の平均値までは回復しておらず、つくばや那覇の上部成層圏でも同様である。2000年以降の変化傾向を図1-3-20下段に示す。上部成層圏では、つくばの高度35km（5hPa）以上で有意な増加傾向がみられる。札幌と那覇でも、増加傾向がみられたが、有意なものは札幌の高度約30～35km付近と那覇の高度約25km付近のみであった。一方、対流圏から下部成層圏では、3地点とも有意な増加傾向がみられた。

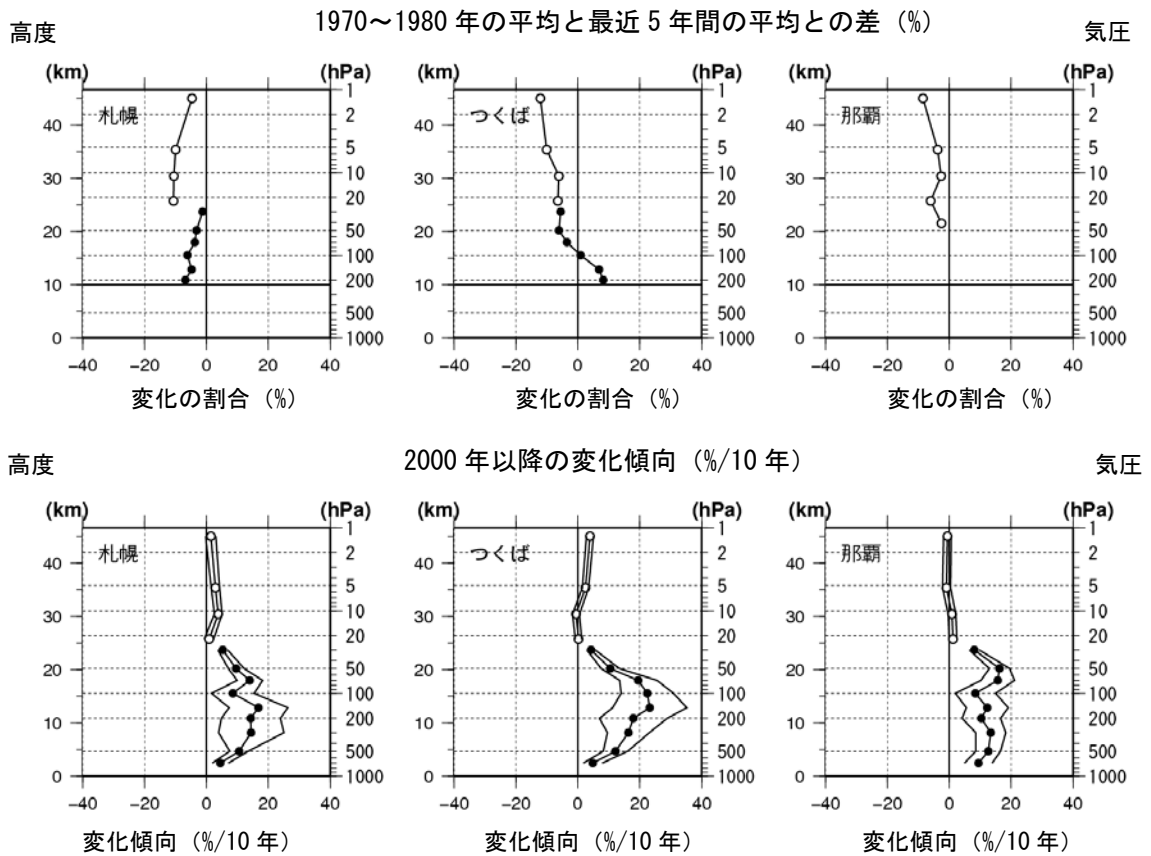


図 1-3-20 日本上空のオゾンの高度別トレンド

上段：1970～1980年平均のオゾン量と最近5年間（2011～2015年）平均との差（%）。下段：2000年以降の変化傾向（%/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。上段は月別平均値から季節変動成分のみを除去し、下段は季節変動および既知の自然変動による影響の成分を除去している。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を表している。

（出典）気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ（2015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. 地表面付近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・一酸化臭素等の無機塩素・臭素化合物を生成する。これらの原子・分子が  $\text{ClO}_x$  サイクルや  $\text{BrO}_x$  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（ $\text{CCly}$ 。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 $\text{CCly}$ に有機臭素濃度 $\text{CBry}$ 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 대기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 대기中濃度は1990年半ばには減少傾向に転じた（詳細はP95の図2-3-11を参照）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P98の図2-3-14を参照）。

このような有機塩素・臭素化合物の地表面濃度の経年変化は、それらの対流圏内の濃度変化を起こす。その後、有機塩素・臭素化合物が成層圏へ達し、分解されて無機塩素・臭素化合物に変わる時、地表面の有機塩素・臭素化合物濃度の変化より数年ほど遅れて成層圏の無機塩素・臭素化合物濃度に変化が起こる。その様子を次節で見ることとする。

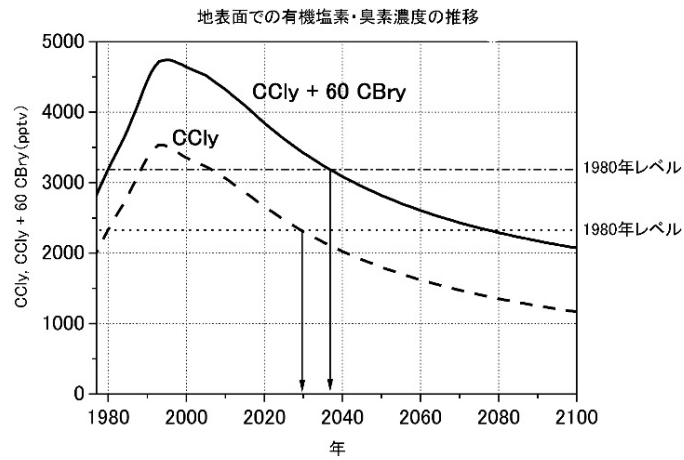


図 1-4-1 オゾン層の長期変化予測数値実験に用いた地表面の有機塩素・臭素濃度の変化シナリオ  
 太い破線は CFC などの有機塩素 (CCly) のみの変化。太い実線は塩素に対する臭素のオゾン破壊効率が 60 倍と仮定して求めた有機塩素・臭素の変化 (CCly+60CBry)。細い点線及び一点鎖線は有機塩素及び有機塩素・臭素濃度の 1980 年レベル。(出典) 国立環境研究所秋吉英治主任研究員提供データ

## 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、成層圏に達した有機塩素・臭素化合物が分解して生じた無機塩素・臭素化合物による塩素・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（b）（P15）脚注を参照）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。地表から対流圏を経て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、地表面や対流圏における有機塩素・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。まず、図 1-4-1 の実線で表された地表面の有機塩素・臭素化合物濃度の変化と比べると、そのピークが数年ほど遅れていることが分かる。EESC のピークは中緯度では 1990 年代後半にあるのに対し、極域では 2000 年頃になっている。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）。

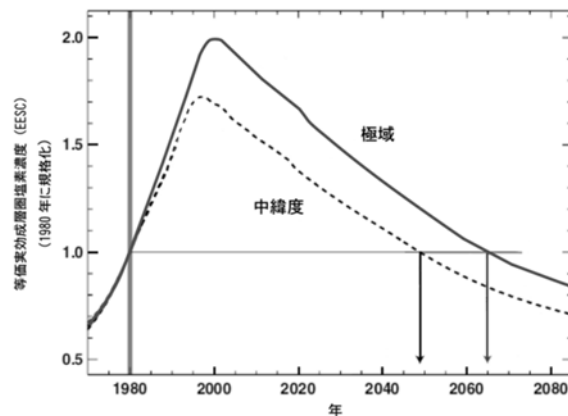


図 1-4-2 中緯度及び極域下部成層圏における等価実効成層圏塩素の推移

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（CO<sub>2</sub>）、メタン（CH<sub>4</sub>）、一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）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（CCl<sub>y</sub>）、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、メタン（CH<sub>4</sub>）、一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）の地表濃度の推移シナリオの例を図 1-4-3 に示す。（図中の CCl<sub>y</sub> 曲線は図 1-4-1 のものと同じ）

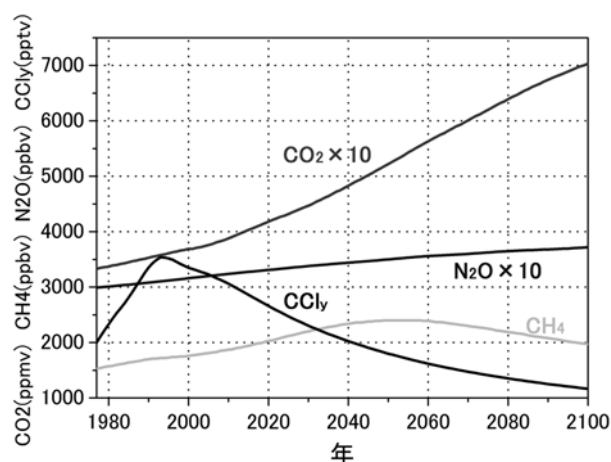


図 1-4-3 成層圏オゾンの長期変化の数値モデル実験を行う際に想定した有機塩素化合物や温室効果ガスの濃度の変化

（出典）国立環境研究所秋吉英治氏提供データ

## 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<sub>2</sub> は最も濃度が高く、成層圏における CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 以外の GHG である CH<sub>4</sub> や N<sub>2</sub>O は CO<sub>2</sub> に比べ濃度が低く、CH<sub>4</sub> や N<sub>2</sub>O 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<sub>4</sub> や N<sub>2</sub>O は成層圏での光化学反応によって、HO<sub>x</sub> や NO<sub>x</sub><sup>\*</sup> の生成に関与する。また CH<sub>4</sub> 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<sub>4</sub> や N<sub>2</sub>O 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<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、HO<sub>x</sub> 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<sub>2</sub>O 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<sub>4</sub> の増加はオゾン層の回復を早める方向に、さらに CO<sub>2</sub> 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, 2015）。

\* HO<sub>x</sub> や NO<sub>x</sub> の定義（説明）については、第 1 部参考資料 1（本文 P48）を参照。

\*\* ClO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 及び HO<sub>x</sub> サイクルについては、同じく第 1 部参考資料 1（本文 P48）を参照。

### 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）。

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（P67～68）を参照）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。

このような化学気候モデルを利用することによって、温室効果気体の増加とオゾン層破壊物質の減少、両者の影響を取り込んだ将来予測実験が可能になってきている。温暖化とオゾン層回復に関わるシナリオをそれぞれ別々に扱うような実験もおこなうことにより、温暖化とオゾン層回復の特徴がより明確に切り分けられるようになる。特に温暖化実験からは、ブリューワ・ドブソン循環に代表される大気循環が強化されるという結果が得られており、そういった輸送効果とオゾンの回復傾向との関連が注目されている。（詳細は第 1 部参考資料 14（P76～77）を参照）。

#### (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 CO<sub>2</sub>）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 部参考資料 14（P76～77）を参照）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)（P46）を参照）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。

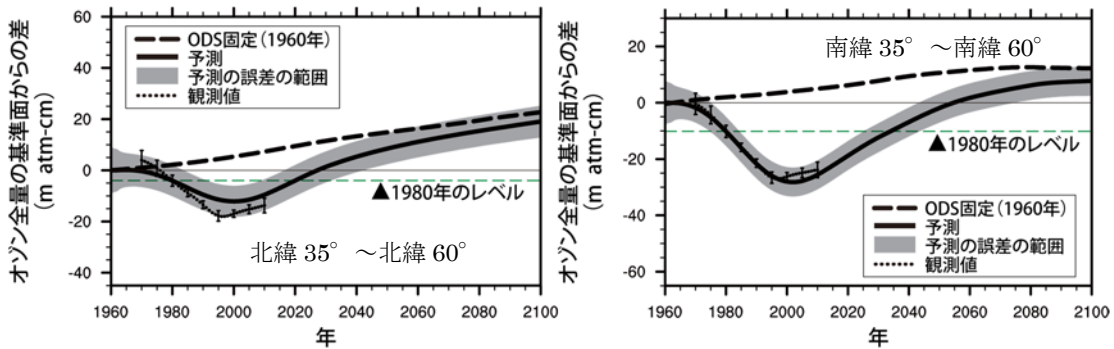


図 1-4-4 中緯度域におけるオゾン全量の推移予測

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2020～2035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部参考資料14（P76～77）を参照）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。

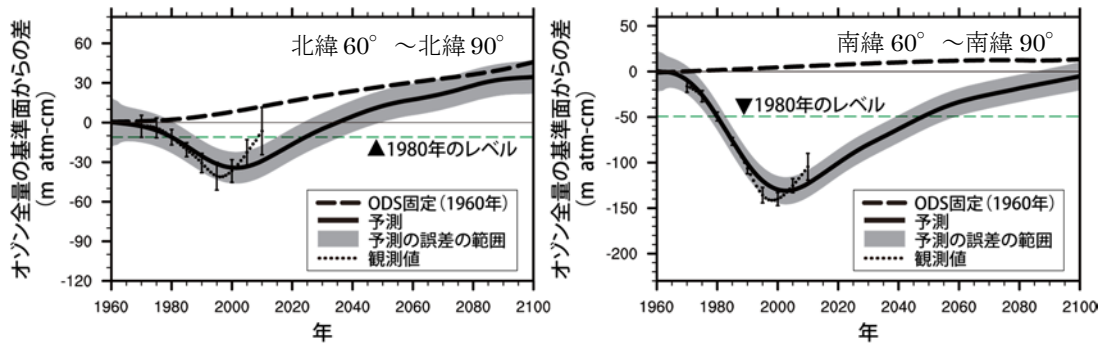


図 1-4-5 北極域及び南極域におけるオゾン全量の推移予測

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 の増加にともなうブリューワー・ドブソン循環の強化によるオゾン濃度の減少（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。



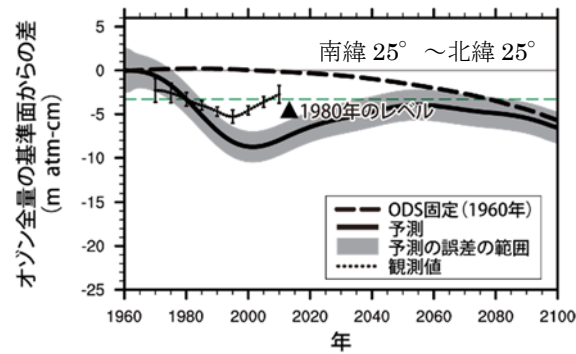


図 1-4-6 低緯度域におけるオゾン全量の推移予測

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（H<sub>2</sub>O）も CO<sub>2</sub> 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、H<sub>2</sub>O は HO<sub>x</sub> 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、2000～2001 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（P43～45）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）。

（詳細は第 1 部参考資料 14（P76～77）を参照）。

##### (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は、化

\* 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。

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拡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。