

## 第3章 南極オゾンホール<sup>7</sup>

### 3-1 2011年の南極オゾンホールの状況

- 2011年のオゾンホールの面積は、9月12日に年最大値となる2,550万km<sup>2</sup>まで拡大した。これは、過去10年間（2001～2010年）の平均とほぼ同程度だった。このことは、極域成層圏雲が出現する目安となる-78℃以下の領域の面積が、年間で最も大きくなる7～8月にかけてほぼ平均並で推移したことに対応している。
- 9月下旬～11月中旬まで、オゾンホールの面積は過去（2001～2010年）の同期間と比べて大きい規模で推移した。
- 2011年の南極昭和基地上空の月平均オゾン全量は、5～7月に多かった以外は並だった。

#### 衛星による観測

衛星観測データの日別値から求めた2011年のオゾンホールの規模の推移を、図I 3-1に示す。2011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12日に今年の最大面積である2,550万km<sup>2</sup>（南極大陸の約1.8倍）まで拡大した。その後、9月下旬～11月中旬まで過去（2001～2010年）の同期間と比べて大きい規模で推移したが、11月中旬以降急速に縮小し、12月22日に消滅した。オゾン欠損量と最低オゾン全量は、10月8日に、それぞれ年最大である8,940万トン、年最低値である94 m atm-cmとなった。

2011年の最大面積は、過去10年間（2001～2010年）の平均（2,520万km<sup>2</sup>）とほぼ同程度で、最近10年間（2002～2011年）では5番目に大きかった。2011年のオゾン欠損量の年最大値は、最近10年間で4番目に大きく、最低オゾン全量の年最低値は、最近10年間で3番目に小さかった。

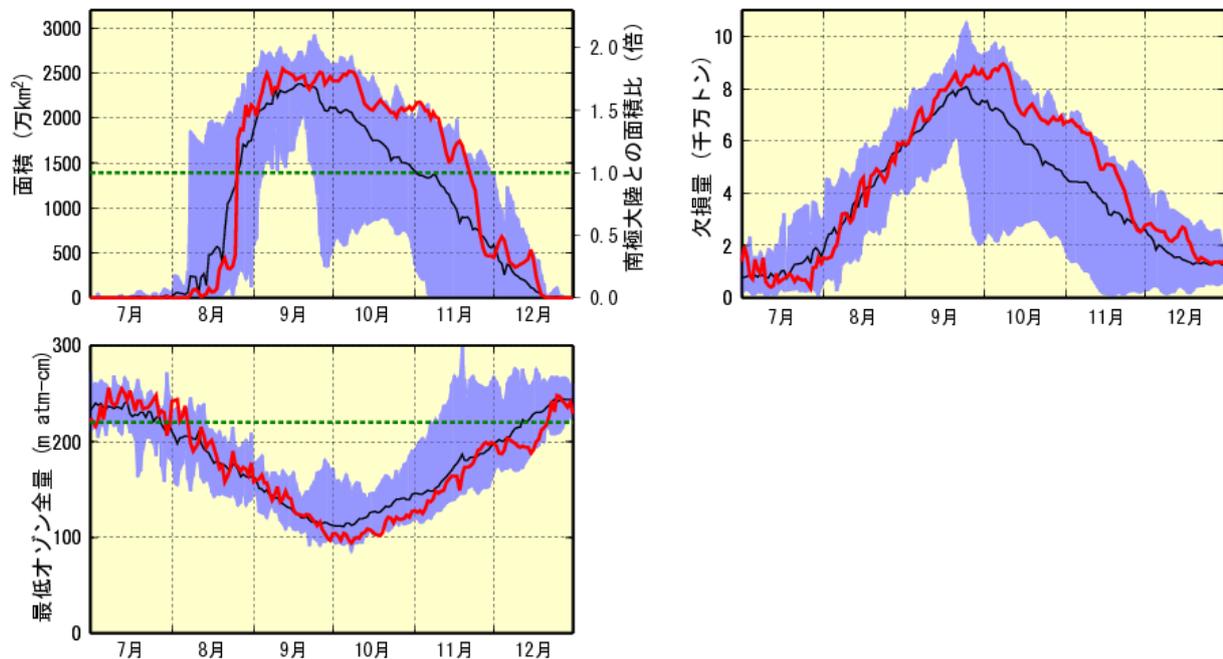


図 I 3-1：オゾンホールの規模（2011年7～12月）

赤線は2011年、黒線は過去10年間（2001～2010年）の平均値、濃い青色の領域の上端と下端は、同期間の最大（最高）値と最小（最低）値を示す。また、面積の図の緑色の点線は南極大陸の面積、最低オゾン全量図の緑色の点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。

<sup>7</sup> 南極オゾンホールの規模の定義については、巻末の「用語解説」を、オゾンホール詳細については気象庁ホームページ「南極オゾンホール」([http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ozonehp/3-21ozone\\_o3hole.html](http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ozonehp/3-21ozone_o3hole.html))を参照。

### 南極昭和基地における地上観測

昭和基地で観測したオゾン全量日代表値の2011年の推移を図 I 3-2に示す。8月末以降、ほぼ全期間を通じてオゾン全量は低く推移し、9月21日に2011年の最小値である149 m atm-cmを記録した。オゾンホールは大気擾乱によって一時的に移動したり変形するため、10 月上・中旬と11月下旬には、昭和基地がオゾンホールの外側に位置し、オゾン全量が220 m atm-cmを上回った。12月17日以降は220 m atm-cmを上回り、300 m atm-cm程度で推移した。

2011年の南極昭和基地上空の月平均オゾン全量は、参照値との比較では、5～7月に多かった以外は並であった（図 I 3-3）<sup>8</sup>。

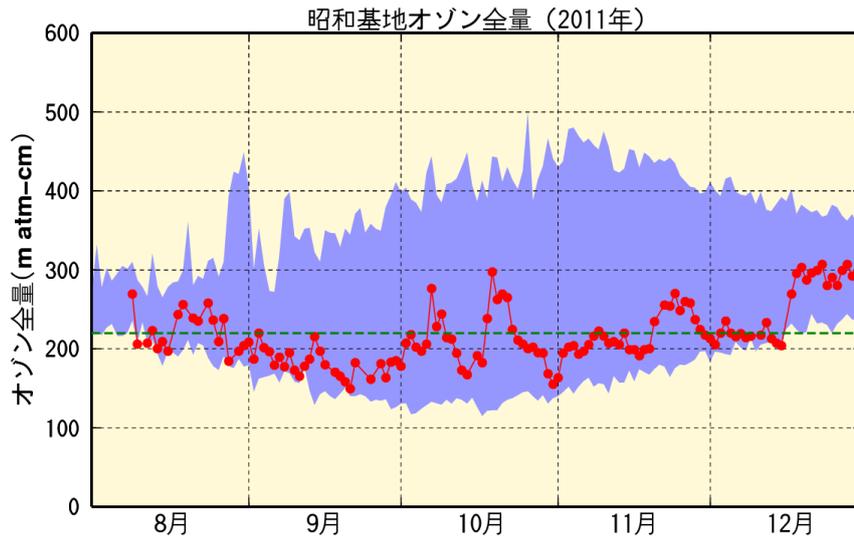


図 I 3-2：南極昭和基地におけるオゾン全量日代表値（2011年8月～12月）

●は2011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）以来の最大および最小値。緑色の横点線はオゾンホールの目安である220m atm-cmの値。

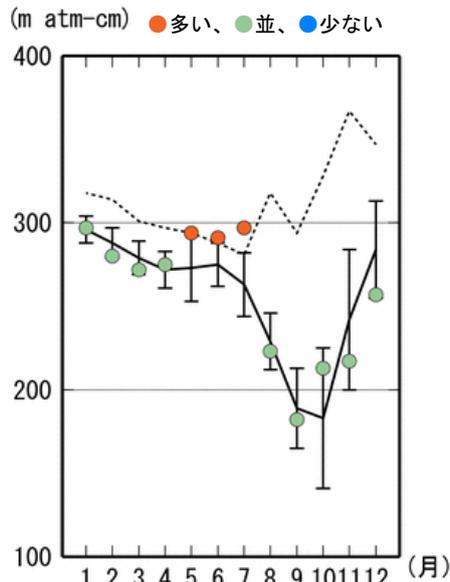


図 I 3-3：南極昭和基地における月平均オゾン全量の年変化（2011年）

●印は2011年の月平均値。折線（実線）は参照値（1994～2008年の累年平均値）で、縦線はその標準偏差である。点線はオゾンホールが出現する以前の1961～1980年の累年平均値。

<sup>8</sup> ここでは、参照値からの差が標準偏差以内のときを「並」、それより大きいときを「多い」、それより小さいときを「少ない」とした。

### 南極昭和基地におけるオゾンゾンデ観測

南極オゾンホール鉛直分布の特徴は、通常オゾン量が多い50hPa（高度21km）付近におけるオゾンが大きく減少するということである。2011年の昭和基地上空におけるオゾン分圧の鉛直分布の年変化を図I 3-4に示す。上図によると、2011年も、50hPa（高度21km）付近でオゾンの減少がみられ、1～8月までは100～30hPa（高度16～24km）付近で概ね10mPa以上となっていたオゾン分圧が、9月半ば～10月にかけて2.5mPa以下のきわめて低い値が観測されるようになり、100hPa付近ではこの状態が12月半ばまで継続した。月平均値の規格化偏差（下図）をみると、50hPa（高度21km）付近では、9～10月の一時期に、オゾン分圧が一時的に高くなり、規格化偏差が+1以上となった。また、高度200hPa（11km）付近では、9～11月に規格化偏差で-1以下と少なかった。

一方、30～14hPa（高度24～30km）付近では、9月末から7.5mPaを上回るオゾン分圧が観測されるようになった。また、12月半ば以降は100～20hPa（高度16～27km）付近でオゾン分圧が10mPa以上となった。これは、昭和基地のオゾン全量が12月半ば以降、220 m atm・cmを上回るようになった（図I 3-2）ことと対応している。

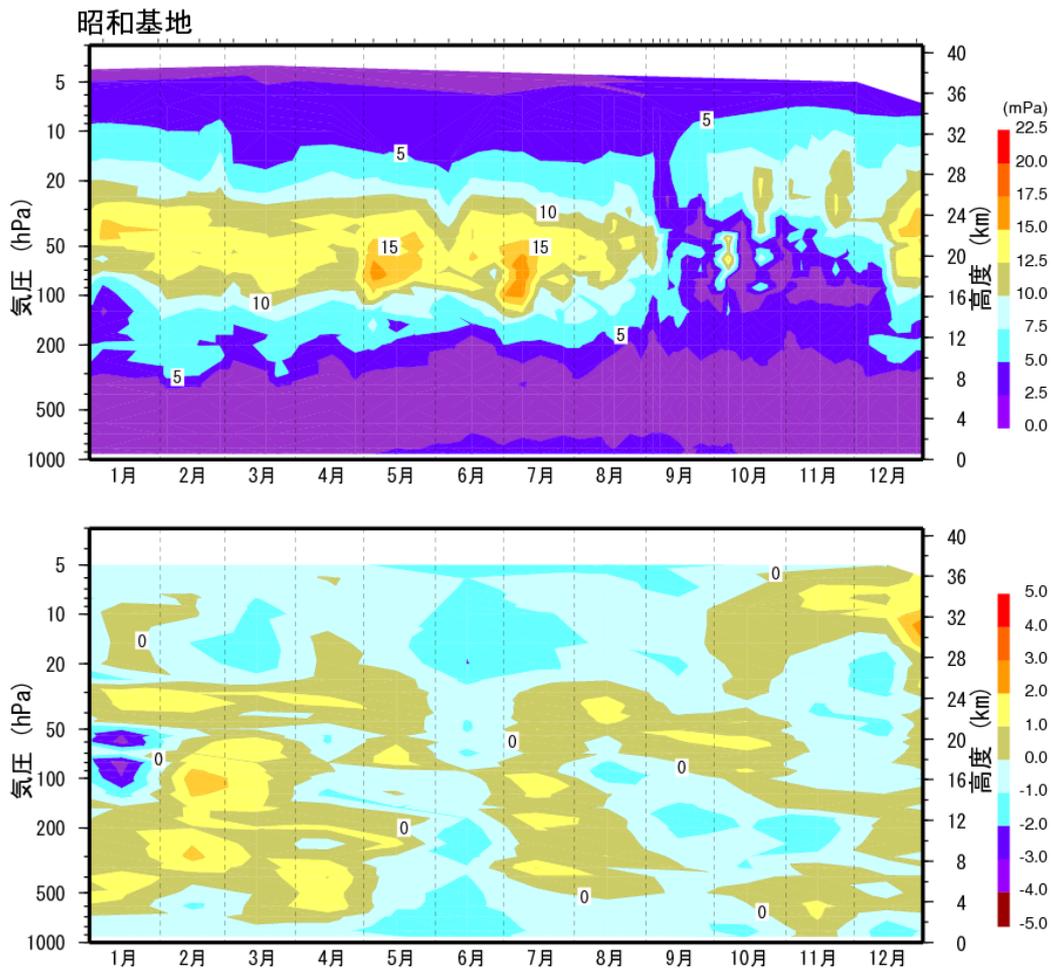


図 I 3-4 : 南極昭和基地のオゾン分圧（上）とその規格化偏差（下）の高度分布（2011年1月～12月）

南極昭和基地のオゾンゾンデ観測によるオゾン分圧・規格化偏差図。オゾン分圧図（上）は個々の観測値を、規格化偏差図（下）は月平均値を用いて作成。規格化偏差は月平均値の参照値からの偏差を標準偏差で割った値。なお、観測データの無い高度については、前後の期間のオゾン分圧から内挿処理を行っている。

### 2011年のオゾンホールに関連する下部成層圏の気象状況

オゾンホールの形成に大きな役割を果たす極域成層圏雲（巻末「用語解説」参照）が生成されるための気象条件として、南半球の冬季から春季にかけて極渦が安定し、下部成層圏の低温が持続することが挙げられる。極域成層圏雲出現の目安が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下であることから、気象庁では南半球30hPa面の $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積を監視している。2011年の南極域の30hPaの日別の南緯60度以南の領域最低気温は、5月から10月上旬まで $-78^{\circ}\text{C}$ 以下となり、特に9月下旬～10月上旬までは低く<sup>9</sup>推移した。10月中旬以降は $-78^{\circ}\text{C}$ を上回るようになったが、10月下旬から11月中旬にかけてと12月半ばに低かった。

2011年の $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の面積の推移をみると、6月中旬から7月はじめまで大きく推移したが、その後面積が縮小し8月末までは平均並だった。9月からは大きくなり、9月半ば以降は過去の最大値を上回る時期が多かった。

2011年のオゾンホールの規模は、年最大面積が過去10年間の平均と同程度だった。これは、極域成層圏雲が出現する目安となる $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積が、年間で最も大きくなる7～8月にかけてほぼ平均並で推移したことに対応している。また、オゾンホールが例年よりも弱まりにくく、過去の平均よりも大きい規模が11月中旬まで継続した原因としては、同期間の気温が低く、極渦が強かったことにより、中低緯度からのオゾン量の高い空気塊の流入が妨げられたためと考えられる。

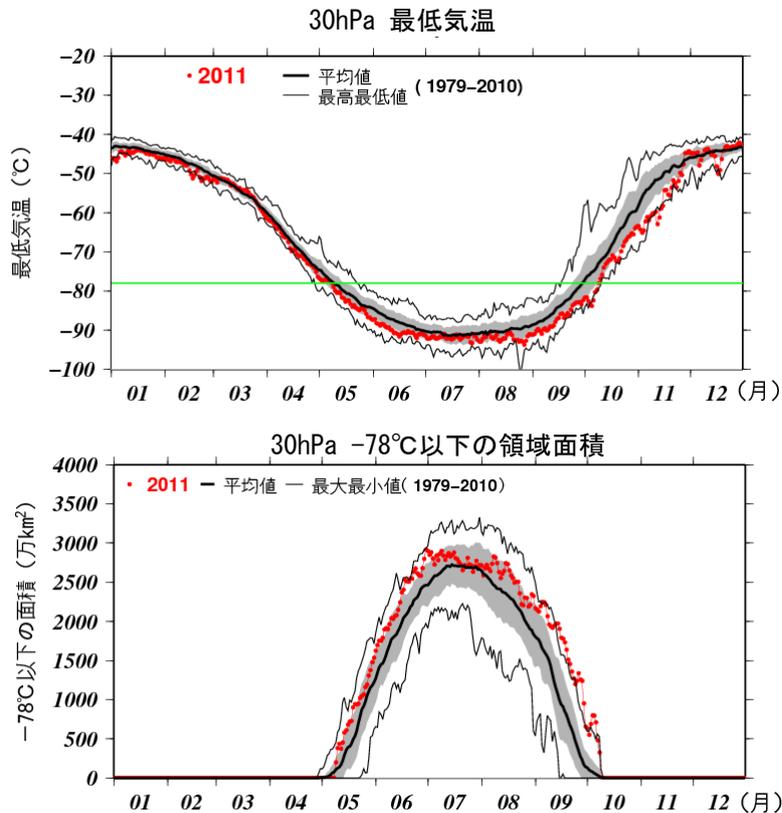


図 I 3-5：南極域上空の下部成層圏の最低気温（上）および気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積（下）の年変化（2011年1月～12月）

南緯60度以南の30hPa（高度約23km）面における日別の領域最低気温の年変化（上）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年変化（下）。陰影中の黒太実線は1979～2010年の累年平均値。陰影の外の黒細実線は同期間の最高（最大）値および最低（最小）値。陰影は標準偏差の範囲。上図の横の緑線は極域成層圏雲出現の目安である $-78^{\circ}\text{C}$ 。米国海洋大気庁－米国大気研究センター（NCEP-NCAR）による解析値をもとに作成。

<sup>9</sup> ここでは1979～2010年の累年平均値を過去の平均として比較を行う。平均との差が標準偏差以内の場合を「平均並」、大きい場合を「高い」「大きい」、小さい場合を「低い」「小さい」と表現する。

### 3-2 南極オゾンホール の 長期変化

- ・南極オゾンホール の 規模は 1980 年代から 1990 年代にかけて急激に拡大した。1990 年代後半以降は、年々変動はあるものの長期的な変化傾向はみられなくなった。
- ・南極昭和基地における 9～12 月の月平均オゾン全量は、1980 年頃から減少し、1990 年代半ば以降は少ない状態が続いている。
- ・南極昭和基地のオゾンゾンデ観測による高度 12～20km の 10 月の月平均オゾン量は、1980 年代に急激に減少し、1990 年代後半以降は 1970 年代と比較して 20%以下の状態が続いている。

#### 衛星観測データからみたオゾンホール の 経年変化

オゾンホール の 面積とオゾン欠損量の年最大値、および年最低オゾン全量の経年変化を図 I 3-6 に示す。これによると、南極オゾンホール の 規模は1980年代から1990年代にかけて急激に拡大した。1990年代後半以降は、年々変動はあるものの、長期的な増加傾向はみられなくなった。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。

オゾンホール 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年々変動がみられる。特に、2000年以降は、年々変動が大きい傾向があり、2002年、2004年はオゾンホール の 規模が一時的に小さくなっている。このような年々変動の原因は、南極域上空の成層圏の気候の変動であり、南半球の冬季から春季にかけての成層圏の極渦の強さや下部成層圏の気温に対応している。2002年 の 場合は、南極域上空で初春に大規模な成層圏突然昇温が発生し、極渦が分裂したことなどによりオゾンの破壊が緩和された。

図 I 3-7に、オゾンホール の 目安である220 m atm-cm以下の領域が消滅した日の経年変化を示す。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）消滅したほかは、12月に消滅することが多く、2011年の消滅日は12月22日と遅かった。

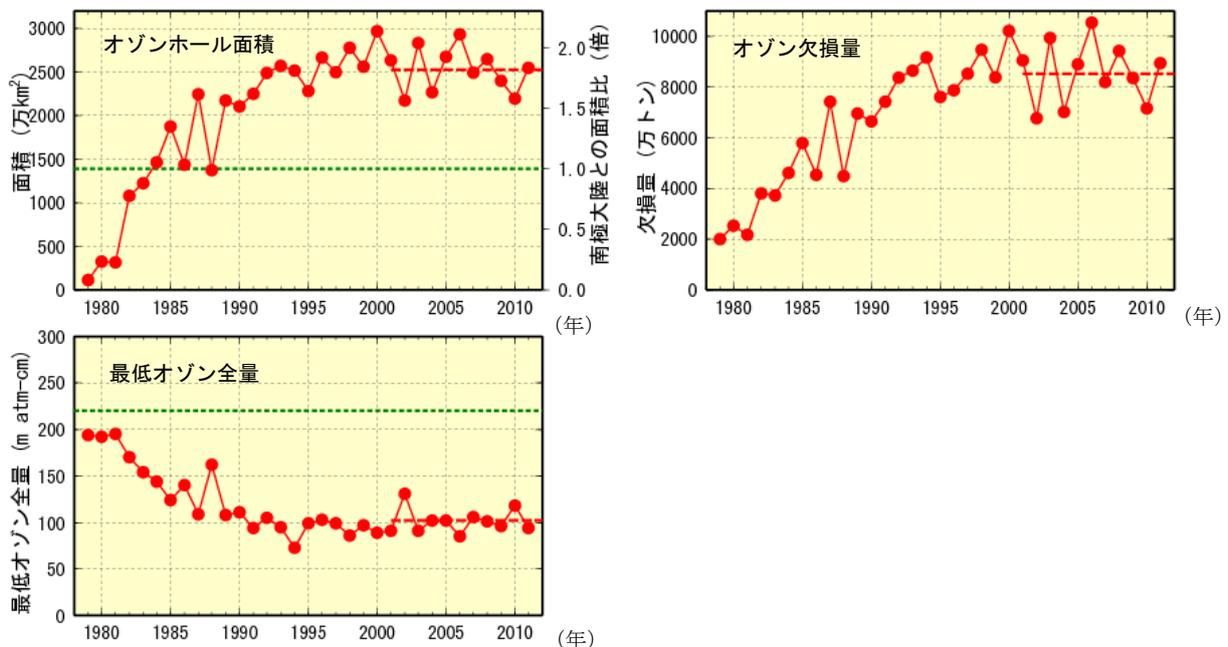


図 I 3-6 : オゾンホール の 規模の経年変化

赤丸は 1979～2011 年のオゾンホール の 面積（左上）、オゾン欠損量（右上）、最低オゾン全量（左下）の年極値。面積の図の緑色の点線は南極大陸の面積、最低オゾン全量の図の緑色の点線はオゾンホール の 目安である 220 m atm-cm を表す。また、各図の赤色の点線は、過去 10 年間（2001～2010 年）の平均を表す。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）。

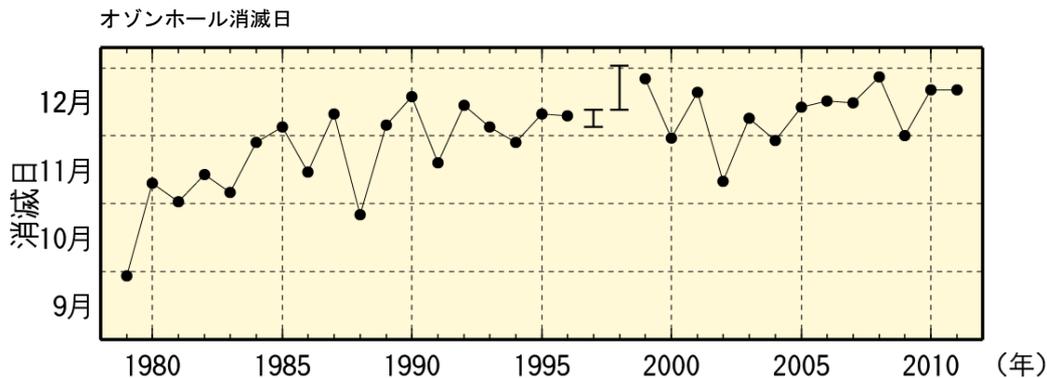


図 I 3-7 : オゾンホールの消滅日の経年変化

1979～2011年の220m atm-cm以下の領域が消滅した日の経年変化。NASA提供の衛星データをもとに作成。ただし、1995年はSBUV/2、2005年以降はOMIのデータをもとに作成した。なお、1997年と1998年については、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。

### 南極昭和基地上空のオゾン量の経年変化

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 I 3-8に示す。オゾンホールの時期にあたる9～12月のオゾン全量が、1980年頃から減少し、1990年代半ば以降は少ない状態が継続しているのがわかる。昭和基地でのオゾン量の変化が必ずしもオゾンホールの規模の変化をそのまま反映しているわけではないが、昭和基地上空はオゾンホールの縁辺となることが多く、オゾンホールの規模の目安となっている。9～11月までの時系列において、2002年にオゾン全量が急増している。これは、前頁で述べた2002年9月に発生した南極域の成層圏突然昇温がもたらした、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に対応しており、昭和基地も含め南極全域でオゾン破壊が大規模には進まなかったことによる。これに対し、2011年のオゾンホール時期(9～12月)のオゾン全量は、1990年代半ば以降の平均とほぼ同程度であった(10月はやや高めであるが、図 I 3-2でみたように2011年10月は、昭和基地が一時的にオゾンホールの外側に位置したためと考えられる)。

図 I 3-9に、昭和基地のオゾンゾンデ観測による10月の高度12～20kmまでの月平均オゾン量の経年変化を示す。この高度のオゾン量は、オゾンホールの発達にともなって大きく減少するため、オゾンホールの長期的な変化傾向についてのよい指標になる。この高度のオゾン量は、1980年代に急激に減少した。その後、1990年代初め以降は、低いレベルで推移しており、1990年代後半以降は、1970年代と比較して20%以下という少ない状態が続いている。10月の極小値は1992年に現れているが、これはピナトゥボ火山噴火(1991年6月)に起因するエアロゾル粒子がこの時期に成層圏に多く混入し、エアロゾル粒子表面での不均一反応のためにオゾン破壊が促進されたためと考えられる。一方、2002年は上述したように南極域で成層圏突然昇温が発生したため、オゾン層破壊が大規模にならなかった。

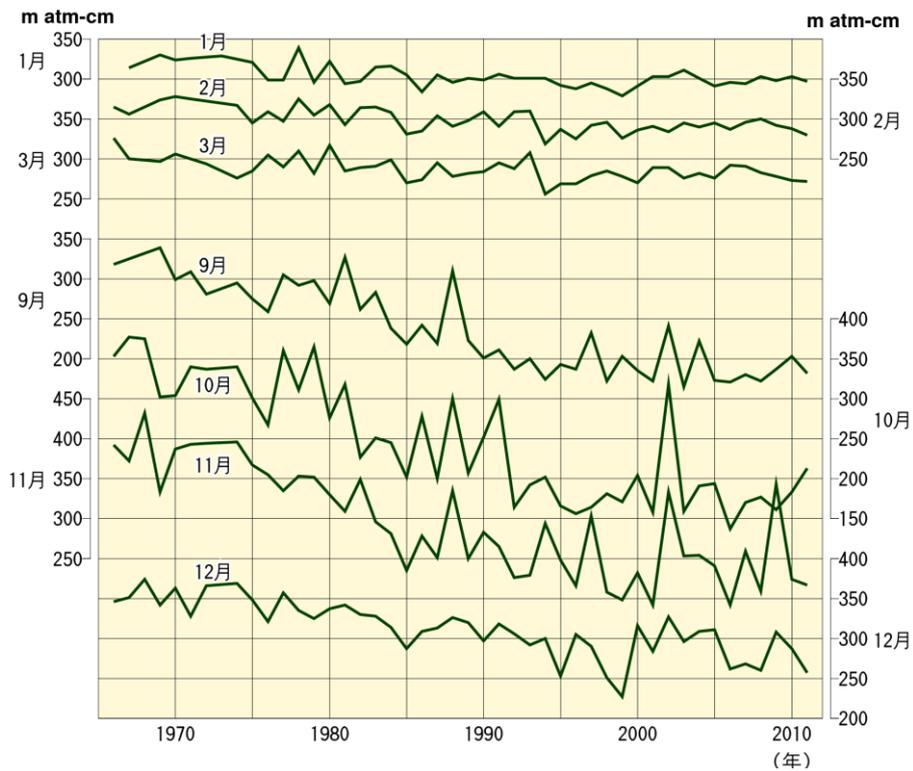


図 I 3-8 : 南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化

この図では、観測値をそのまま使用した（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ない）。

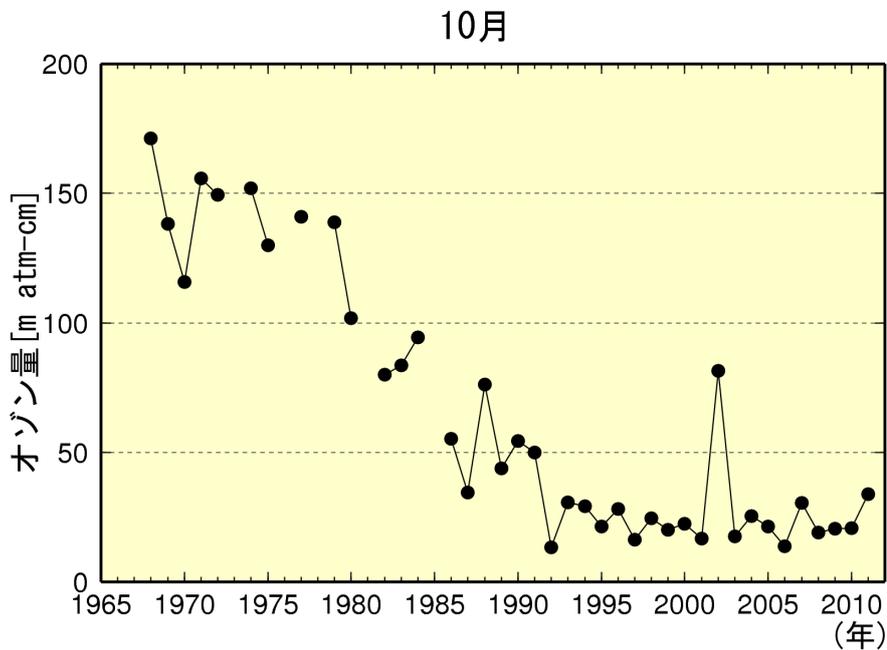


図 I 3-9 : 南極昭和最地上空（高度12～20km）の10月の月平均オゾン量の経年変化

この図の値は、観測値をそのまま使用した（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ない）。

### 南極昭和基地上空のオゾンの長期変化傾向

南極昭和基地上空のオゾンの鉛直分布の長期変化傾向を示すため、2011年の成層圏におけるオゾン分圧の1979年に対する変化の割合(%)の高度分布を図I 3-10上段に示す。これは、オゾンゾンデ観測による高度別オゾン分圧について、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のち1979~1996年と1997~2011年の2つの回帰直線により求めた値である。これをみると、通年では高度15km(約100hPa)付近でのオゾン減少が大きく、春季(9~11月)はそれが特に顕著である。

最近の変化傾向を示すため、1997~2011年のデータから直線回帰により求めた変化傾向を図I 3-10下段に示す。通年、春季ともに特に顕著な傾向はみられず、同図上段に示した結果を踏まえると、オゾン分圧の低い状態が続いている。

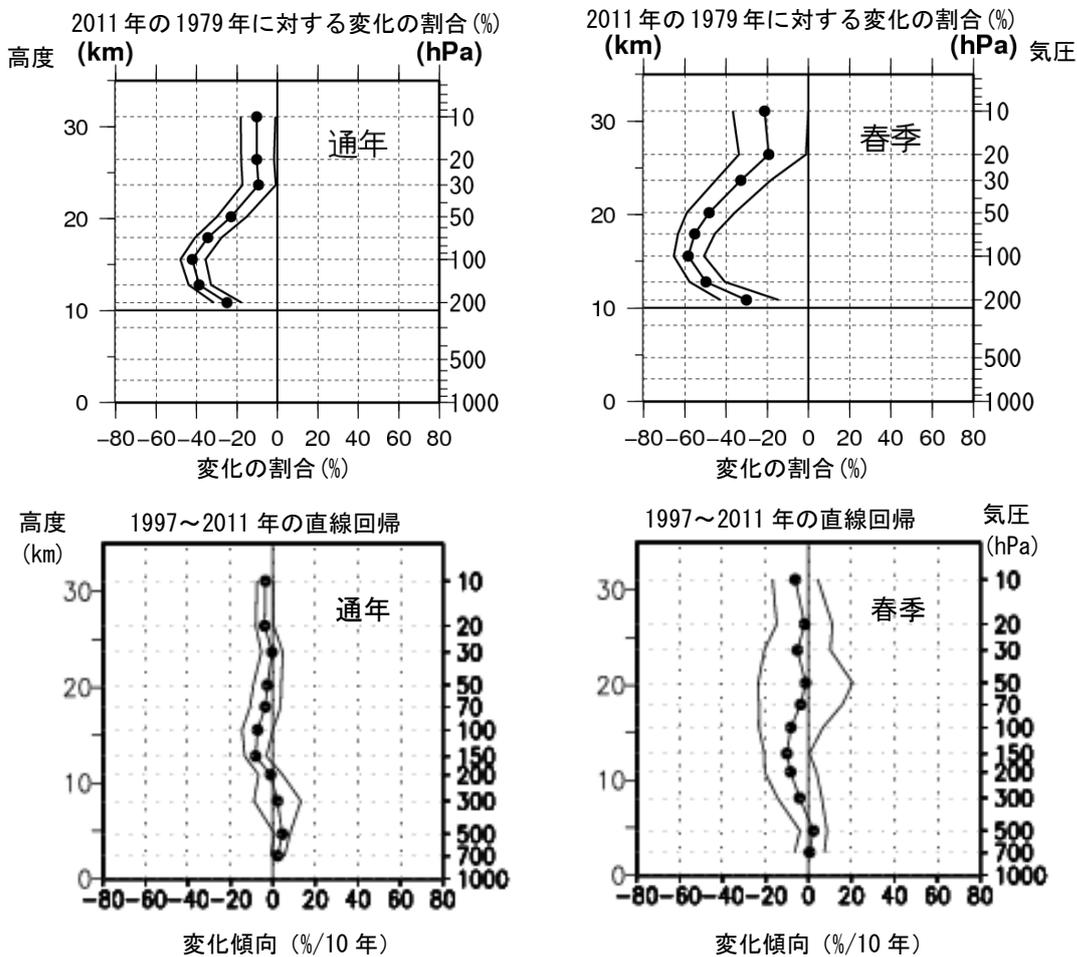


図 I 3-10 : 南極昭和基地におけるオゾン分圧の長期変化傾向の高度分布

オゾンゾンデ観測から求めた高度別オゾン分圧の長期変化傾向。上段は 1979~1996 年と 1997~2011 年の 2 つの回帰直線から求めた 2011 年の成層圏におけるオゾン分圧の 1979 年に対する変化の割合(%)。下段は 1997~2011 年のデータから直線回帰により求めた変化傾向(%/10年)。横軸は変化量、縦軸は高度。外側の折線は 95%信頼区間。左(通年)は月別値(1~12月)から、右(春季)は月別値(9~11月)の値から求めた変化傾向。