

## 第3章 南極オゾンホール<sup>5</sup>

### 3-1 2012年の南極オゾンホールの状況

○2012年のオゾンホールの面積は9月22日に最大となったが、観測された年最大値は2,080万km<sup>2</sup>に留まり、1990年代以降で最も小さかった。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7~8月にかけて小さかったこと、南半球冬季の対流圏での例年より活発な波活動の影響で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たことが要因として考えられる。

○2012年の南極オゾンホールの期間の昭和基地上空の月平均オゾン全量は、9~12月に「多い」となった。

#### 衛星による観測

衛星観測データの日別値から求めた2012年のオゾンホールの規模の推移を、図I 3-1に示す。2012年のオゾンホールは、例年と同様に8月に発生した後、過去(2002~2011年)の同時期と比べて小さい規模で推移し、9月22日に今年の最大面積である2,080万km<sup>2</sup>(南極大陸の約1.5倍)まで拡大した。その後、オゾンホールの面積は、9月末から減少しはじめ、過去(2002~2011年)の同時期と比べて小さい規模で推移し、11月16日に消滅した(図I 3-1a)。オゾン欠損量は9月22日に年最大値である6,810万トン、最低オゾン全量は10月1日に年最低値である123 m atm-cmとなった。

2012年の最大面積は、1990年代以降で最も小さかった。2012年のオゾン欠損量の年最大値は、1990年代以降では1990年、2002年について3番目に小さく、最低オゾン全量の年最低値は、2002年について2番目に高かった。

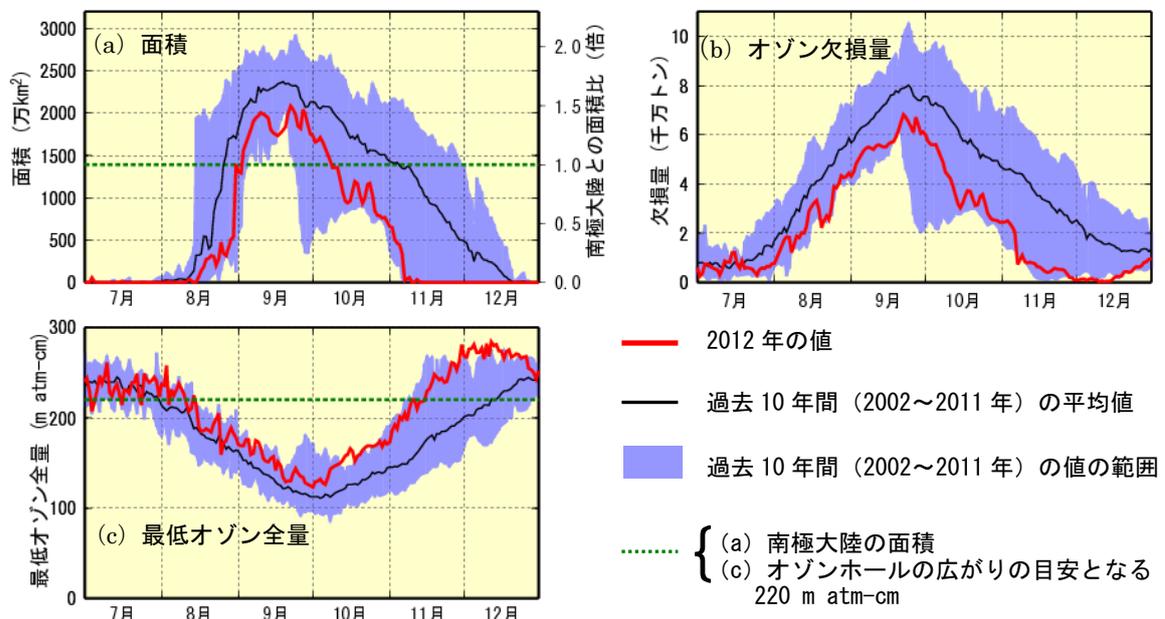


図 I 3-1 : オゾンホールの規模 (2012年7~12月)  
NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。

<sup>5</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/3-30ozone\\_o3hole.html](http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ozonehp/3-30ozone_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2012年の推移を図 I 3-2に示す。9月上旬からオゾンホールが目安である220 m atm-cmを大きく下回るようになり、9月23日に2012年の最小値である176 m atm-cmを記録した。しかし、オゾンホールが大気擾乱によって移動または変形することに対応して、9月下旬から10月には、昭和基地がオゾンホールの外側に位置する日も多く、オゾン全量が220 m atm-cmを上回ることが多くなった。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。

2012年の南極昭和基地上空の月平均オゾン全量を参照値と比較すると、オゾンホール期間の9～12月に「多い」となった（図 I 3-3）。特に、11月はオゾンホールが出現する以前の期間の平均に近い値だった。

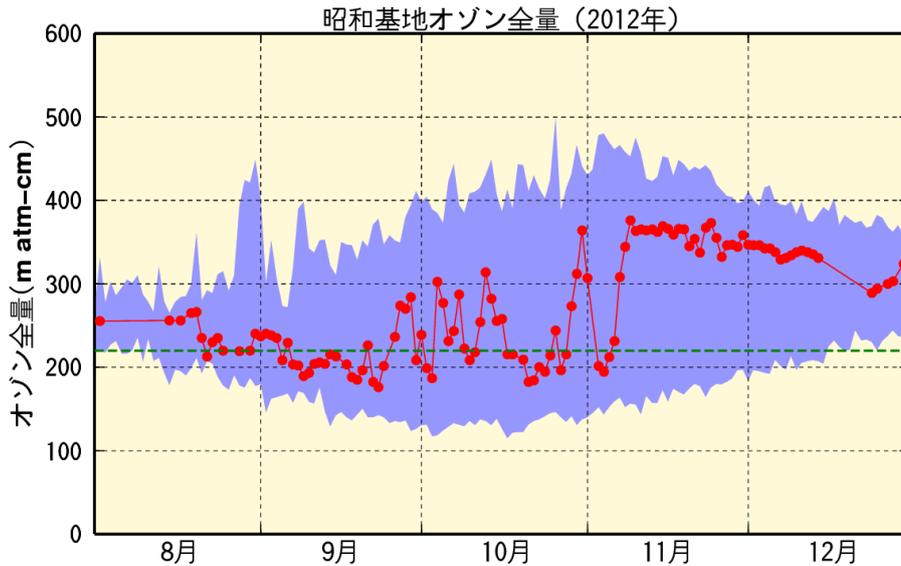


図 I 3-2：南極昭和基地におけるオゾン全量日代表値（2012年8～12月）

●は2012年の観測値（日代表値）。濃い青色の領域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220 m atm-cmの値。

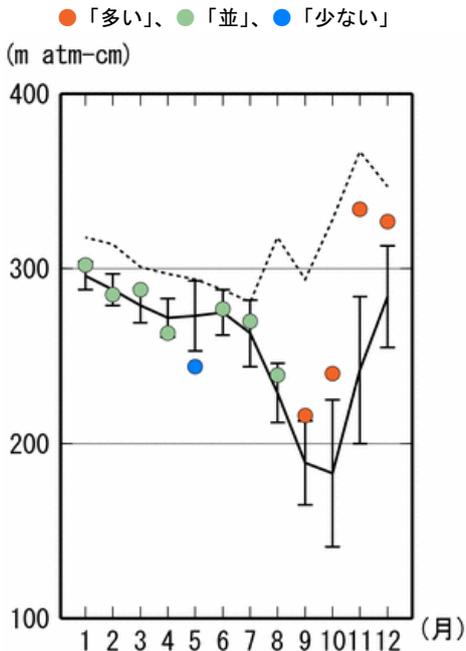


図 I 3-3：2012年の南極昭和基地における月平均オゾン全量

●印は2012年の月平均値。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。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

南極オゾンホールの特徴は、通常オゾン量が多い50hPa（高度19km）付近におけるオゾンが大きく減少することである。2012年の昭和基地上空におけるオゾン分圧の鉛直分布を図I 3-4に示す。図I 3-4aをみると、2012年も、50hPa（高度19km）付近でオゾンの減少がみられ、1～8月に100～30hPa（高度15～23km）付近で10mPa以上となっていたオゾン分圧が、9月下旬～10月にかけて2.5mPa以下と極めて低い値となった。一方、30～10hPa（高度23～30km）付近では、10月前半に10mPaを上回るオゾン分圧が観測された。11月になると、100～20hPa（高度15～25km）の広い範囲でオゾン分圧が12.5hPa以上と高くなり、12月もやや縮小しながら継続した。これは、昭和基地のオゾン全量が11月6日以降、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。

月平均値の規格化偏差（図I 3-4b）をみると、オゾンホールが現れた8月以降は、全般に参照値より多く、特に8月の100hPa（高度15km）付近で規格化偏差が+2以上となった。また、11月の100hPa（高度15km）付近と400hPa（高度6km）付近で規格化偏差が+5以上だった。

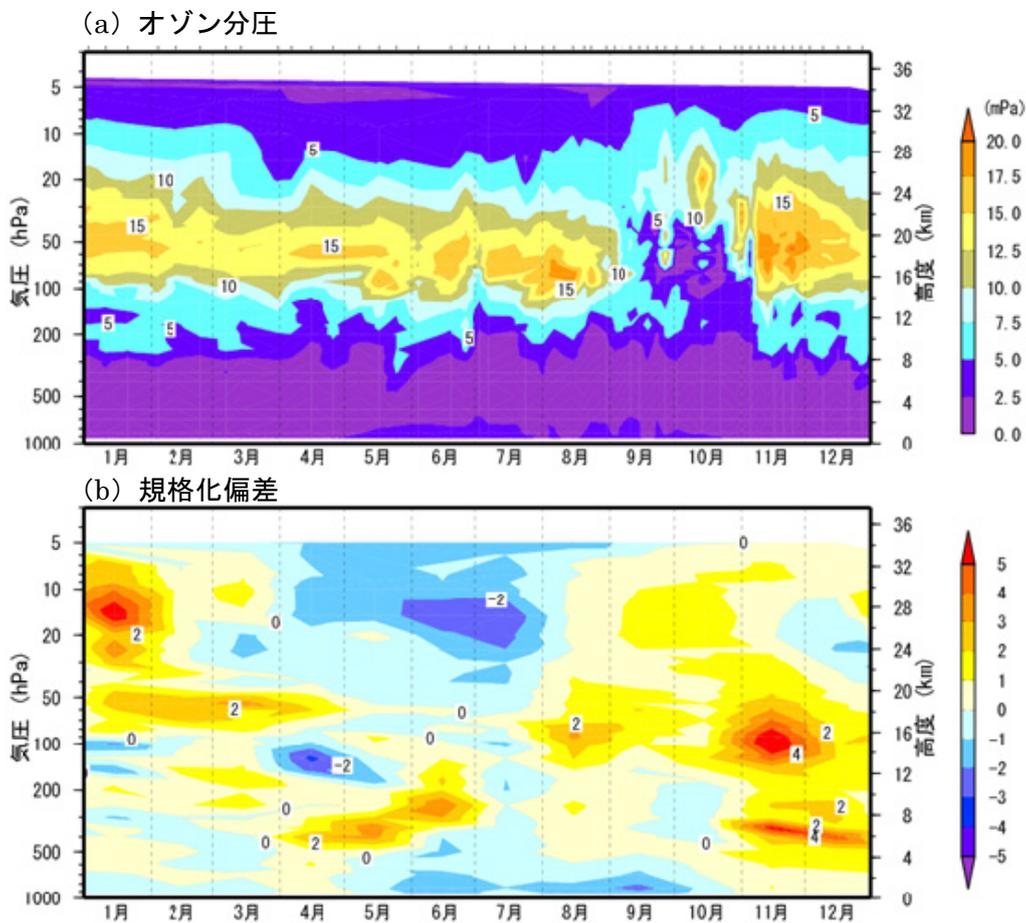


図 I 3-4 : 南極昭和基地の (a) オゾン分圧と (b) その規格化偏差の高度分布 (2012年1～12月)

オゾン分圧図 (a) は個々の観測値を、規格化偏差図 (b) 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。観測データのない高度については、前後の期間のオゾン分圧から内挿処理を行っている。なお、参照値および標準偏差の図は、気象庁ホームページ ([http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ozonehp/3-20ozone\\_avemap.html](http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ozonehp/3-20ozone_avemap.html)) に掲載している。

## 2012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は、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（ $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の低温）が持続することである。冬季の極域成層圏雲の面積が大きいほど、その年のオゾンホールの規模が大きくなる傾向がある。一方、オゾンホールの発達を妨げる要因として、対流圏からの波活動が活発になることがあげられる。南半球冬季に対流圏の波活動が活発になると、春先に極渦周辺の気温が高くなり（Newman *et. al*, 2004）、その結果、低緯度側からオゾン量の多い空気塊の輸送が増えるため、オゾンホールの発達を妨げる。

2012年の南極下部成層圏（50hPa）の領域最低気温<sup>6</sup>（図I3-5a）は、例年と同じ5月中旬～10月上旬の期間 $-78^{\circ}\text{C}$ 以下であり、この期間中はほぼ平均程度で推移した。9月下旬に急速に昇温した後、10月中旬以降のほとんどの期間で過去の平均より高い状態だった。なお、7月上・中旬にも気温が上昇し、過去の平均より高くなっている。また、オゾンホールの規模と密接な関係のある $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積（図I3-5b）は、ほぼ平均程度に推移したが、7月後半、8月下旬および9月下旬以降で過去の平均より小さくなり、10月上旬に面積がゼロとなった。

2012年のオゾンホールの規模は、1990年代以降で最も小さかった。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、7～8月にかけて小さかったこと、また、2012年冬季に南半球対流圏の波活動が例年より活発だったため、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。

---

<sup>6</sup> 「オゾン層・紫外線の年のまとめ（2011年）」においては、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、本稿よりこれを用いることとする。

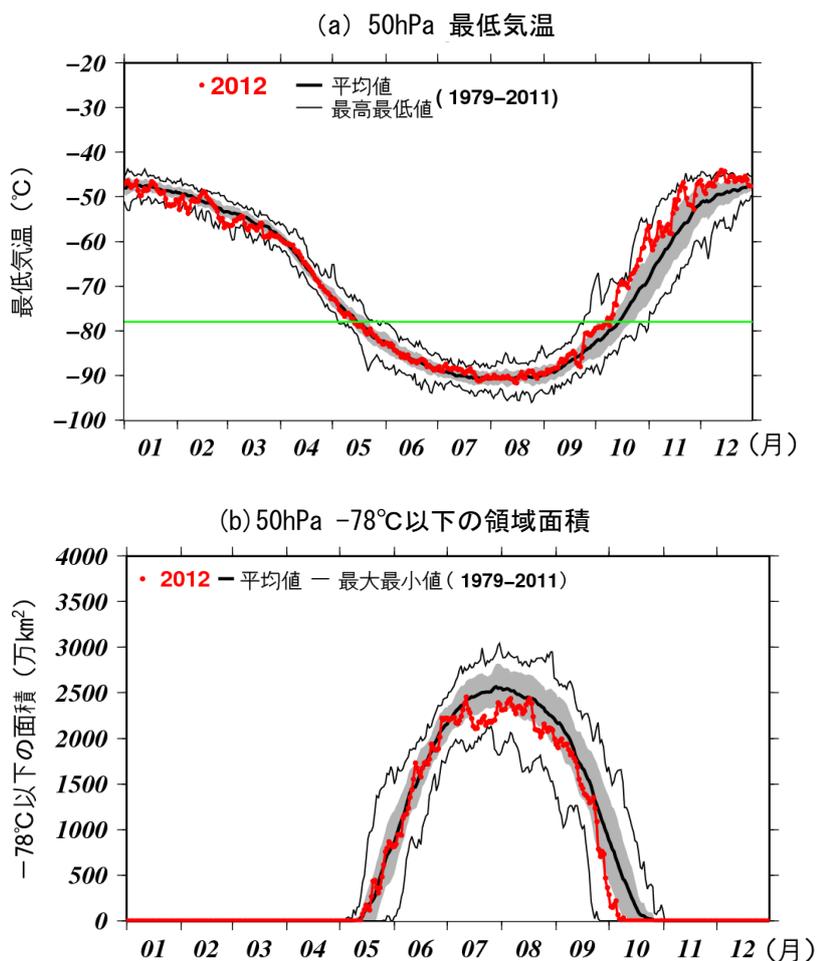


図 I 3-5 : 2012年の南極域上空の (a) 下部成層圏の最低気温および (b) 気温が $-78^{\circ}\text{C}$ 以下の領域の面積

2012年の南緯60度以南の50hPa（高度約20km）面における (a) 日別の領域最低気温と (b) 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。陰影中の黒太実線は1979～2011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（Kalnay *et. al*, 1996）をもとに作成。1979～2011年の累年平均値との差が標準偏差以内のときを「平均程度」、それより大きいときを「高い」「大きい」、それより小さいときを「低い」「小さい」とした。

### 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年代半ばにかけて急激に拡大したが、1990年代半ば以降は、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。
- ・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年代後半以降のほとんどの年で1970年代と比較して20%以下の少ない状態だった。

#### 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年代半ばにかけて急激に拡大した。1990年代半ば以降は、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。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。

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、2010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は、南極域上空の成層圏の大気の変動に関係しており、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、南極域上空で冬季から初春の下部成層圏の気温が高く、極域成層圏雲の発生する-78℃以下の面積が例年より小さかったこと、初春に大規模な成層圏突然昇温が発生し、極渦が分裂したため、低緯度のオゾン濃度の高い空気と混合したことなどによりオゾンの破壊が大きく緩和された。

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かった。2012年の消滅日は11月16日であり、1990年代以降では2002年について2番目に早かった。

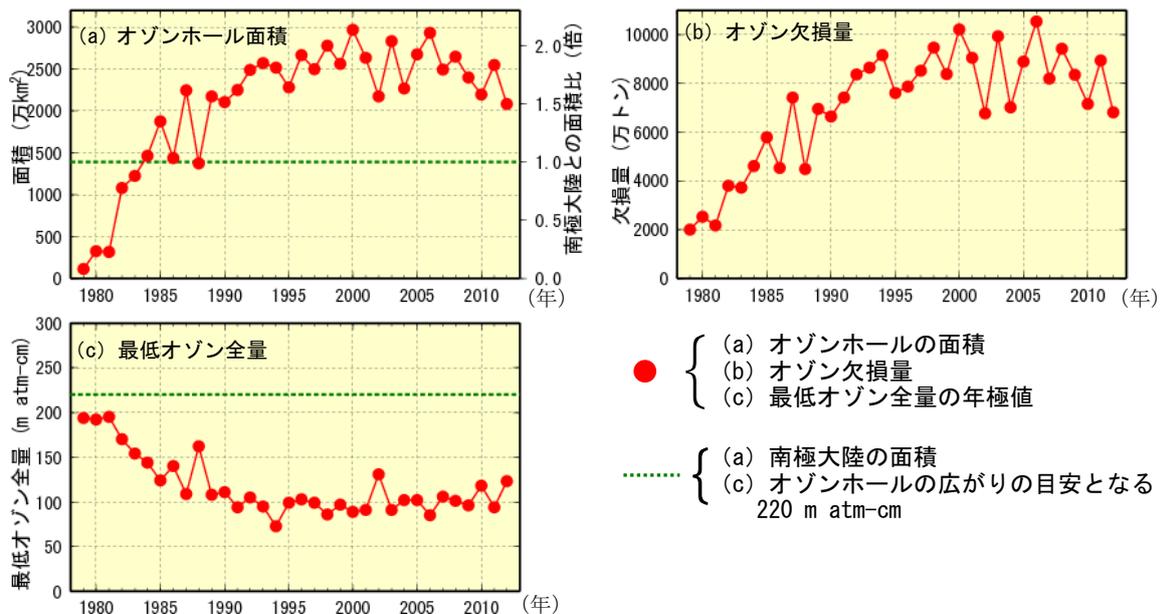


図 I 3-6 : オゾンホールの規模の経年変化

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）。

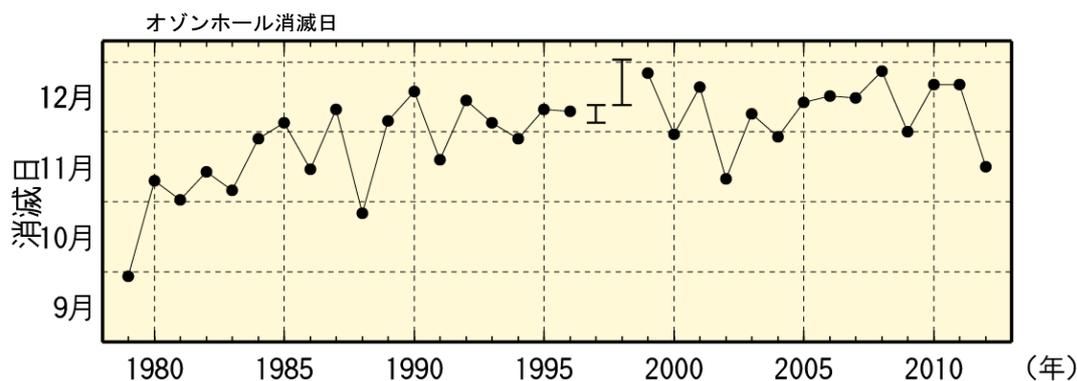


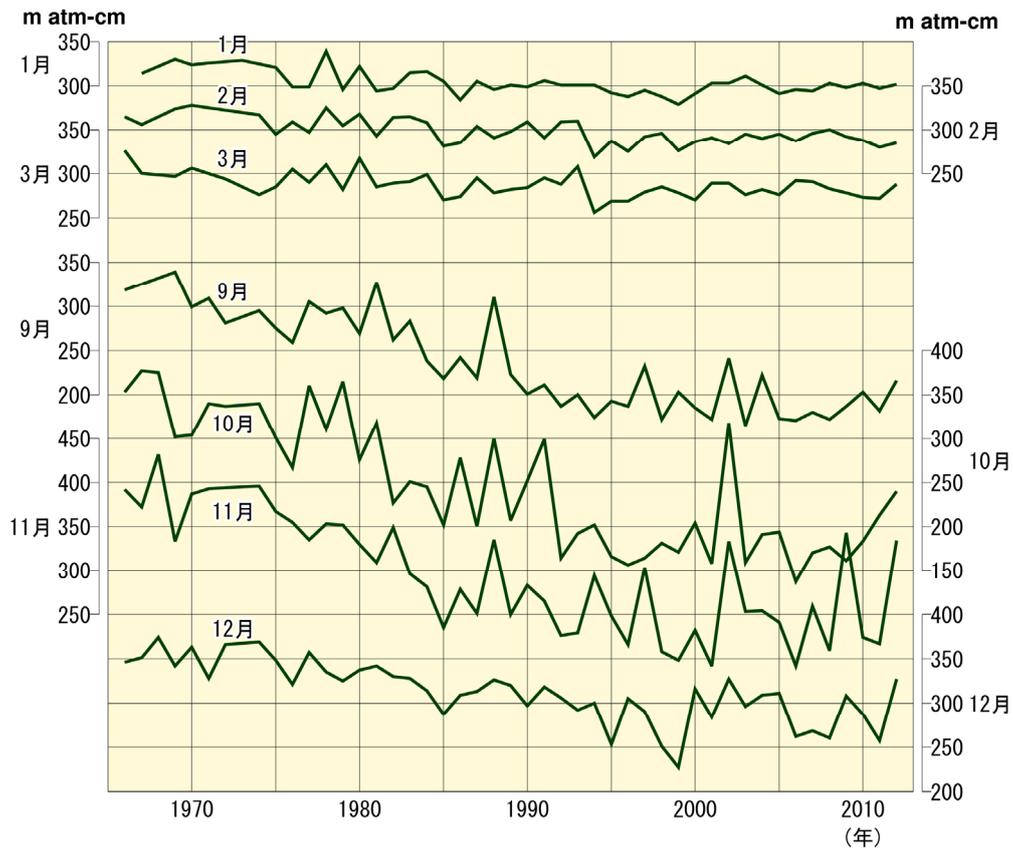
図 I 3-7 : オゾンホールの消滅日の経年変化

1979～2012年の220 m 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

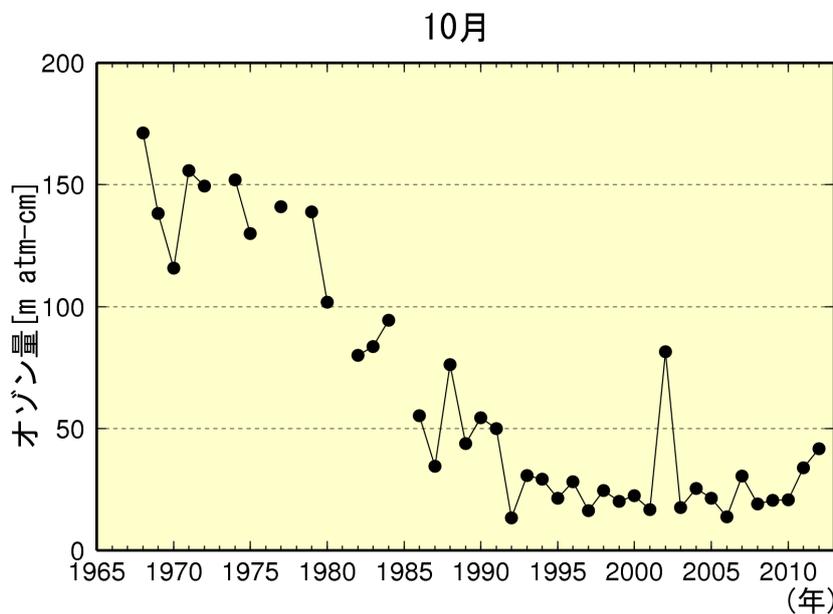
南極昭和基地における春～秋季にかけての月平均オゾン全量の経年変化を図 I 3-8に示す。オゾンホールのない時期(1～3月)と比較すると、オゾンホールの時期にあたる9～12月のオゾン全量は1980年頃から減少し、1990年代半ば以降は少ない状態が継続しているのがわかる。昭和基地でのオゾン量の変化が必ずしもオゾンホールの規模の変化をそのまま反映しているわけではないが、昭和基地上空はオゾンホールの縁辺となることが多く、オゾンホールの規模の目安となっている。9～11月の時系列において、2002年にオゾン全量が急増しているのは、前頁で述べた2002年9月に発生した南極域の成層圏突然昇温がもたらした、成層圏の気温が過去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。2012年のオゾンホール時期(9～12月)のオゾン全量は、いずれの月も1990年代半ば以降の中では多かった。

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の層内における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年代後半以降のほとんどの年は、1970年代と比較して20%以下という少ない状態だった。2012年は約30%とやや高い値となった。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 : 南極昭基地上空（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、2012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 3-10a, b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折れ線フィッティングにより求めた値である。これをみると、通年では100 hPa (高度15km) 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。

1997年以降の変化傾向を図I 3-10c, dに示す。通年では200hPa (高度10 km) 付近、100hPa (高度15km) 付近で、春季では100hPa (高度15km) 付近で有意な増加傾向がみられたが、それ以外の高度では有意な傾向はみられなかった。このように、昭和基地上空のオゾンは、1997年以降一部高度で有意な増加傾向も見られるが、1979年時点と比べれば、依然として広い高度範囲でオゾン分圧の低い状態が続いているといえる。

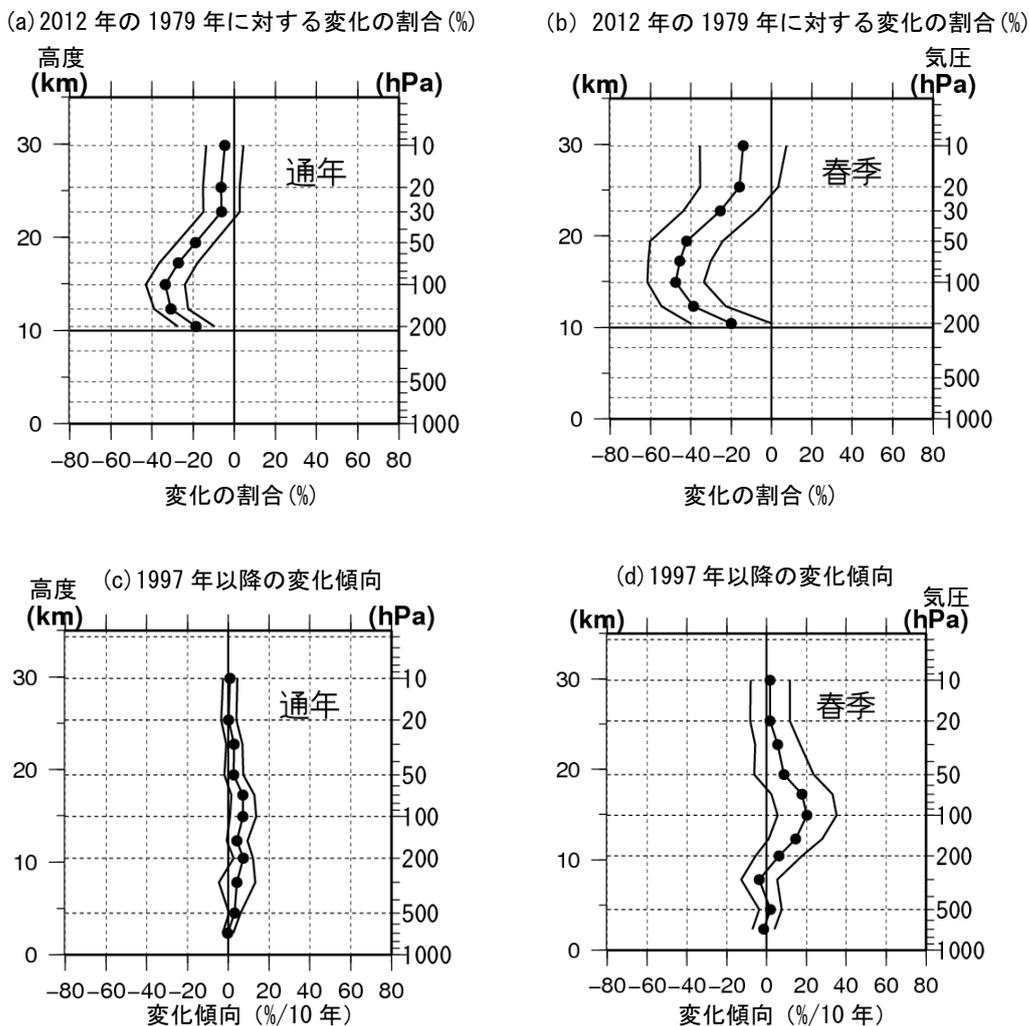


図 I 3-10 : 南極昭和基地におけるオゾン分圧の長期変化傾向の高度分布

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 (a, b) は2012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 (c, d) は1997年以降の変化傾向(%/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 (a, c) は、通年で月別値(1~12月)から、右 (b, d) は春季で、月別値(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長期変化傾向の解析から求めた。