

第3章 南極オゾンホール

1980年代初めに、春季の南極昭和基地上空のオゾン全量がそれまでと比較して、著しく少なくなっていることが、気象庁等の観測により発見された。これは後日オゾンホールと呼ばれるようになった現象を観測したものであった。

オゾンホールは南極上空のオゾン量が極端に少なくなる現象で、オゾン層に穴の開いたような状態であることからその名が付けられた。南半球の冬季から春季にあたる8～9月ごろに発生、急速に発達し、11～12月ごろに消滅するという季節変化をしている。

気象庁ではオゾンホールの規模の目安として、南緯45度以南での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要素を以下のように定義して用いている。

オゾンホール面積	：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（オゾン全量の世界の平均値）に回復させるために必要なオゾンの質量

これらの量は、主にNASAの衛星観測によるオゾン全量データをもとに算出しており、2005年以降はオーラ衛星に搭載されているOMIによるオゾン全量のデータ、それ以前はアースプローブ衛星などに搭載されているTOMSによるデータを使った（付録1-3参照）。一方、地上からの観測データとして、オゾンホールの縁辺に位置することが多い南極昭和基地におけるドブソンオゾン分光光度計によるオゾン全量観測結果と、オゾンゾンデによる鉛直分布の観測結果を使用した。また、3-2節の経年変化の調査で用いるEESC（等価実効成層圏塩素）は南極域用のEESCを利用した（「解説2」参照）。なお、この値は、第I部解説2で図示したように世界全体（第II部第1章）および日本上空（同第2章）とは異なる。

以下に2010年の南極域上空のオゾン層の状況とオゾンホールの経年変化について述べる。

3-1 2010年の南極オゾンホールの状況

衛星による観測

オーラ衛星のOMIの日別値から求めた2010年オゾンホールの規模の推移を、図II 3-1に示す。2010年のオゾンホールは、8月に発生したが例年よりも拡大が遅く、9月中旬までは過去10年間の最小規模で推移した。最低オゾン全量も、この期間では過去10年間の最大に近い値で推移した。9月下旬にはオゾンホールはピークを迎え、面積は9月25日に年最大となる2,190万km²、オゾン欠損量は9月29日に年最大となる7,160万トン、最低オゾン全量は10月1日に年最低値である118 m atm-cmとなった。10～11月にかけてのオゾンホールの規模の縮小は例年に比べて緩やかであったため、12月初めには過去の同期間と比べ大規模となった。その後、急速に規模が縮小し12月22日にオゾンホールは消滅した。

2010年の最大面積は、過去10年間では2002年に次いで小さかった。大規模なオゾンホールが連続して発生するようになった1990年以降（3-2節参照）でも、1990年、2002年に次いで3番目に小さかった。2010年のオゾン欠損量の最大値は、1990年以降では4番目に小さかった。

南半球高緯度の月平均オゾン全量・偏差分布図（資料1）をみると、2010年のオゾンホールの規模が小さかった8月、9月に、南極大陸周辺の太平洋側で顕著な正偏差がみられた。これは、オゾンホールの太平洋側への広がり が特に弱かったことに対応している。

オーラ衛星のOMIによる2010年8～12月までの南半球の旬平均オゾン全量分布図を、資料4「南半球旬平均オゾン全量分布図（2010年8月～12月）」に示す。

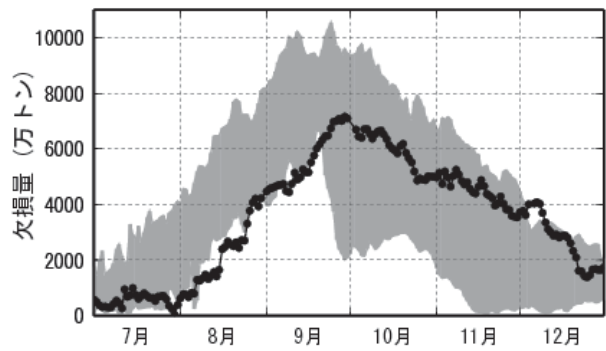
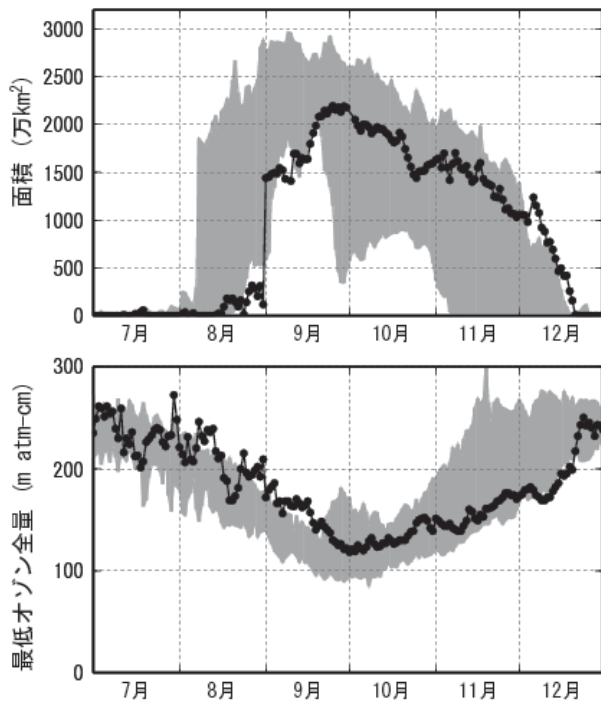


図 II 3-1：オゾンホール規模
(2010年7～12月)

●印は2010年の日々のオゾンホールの規模。陰影部の上端と下端は2000～2009年の日別値の最大および最小値を示す。NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。

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2010年の変化を図 II 3-2に示す。9月から10月にかけて、オゾンホールの目安である220m atm-cmを下回る状態がほぼ継続しており、10月6日に、2010年の最低値である145m atm-cmを記録した。11月以降は昭和基地がオゾンホールの外側にくることが多くなり、オゾン全量が220 m atm-cmを頻繁に上回るようになった。12月7日以降は300m atm-cm程度で推移した。

2010年の南極昭和基地上空の月平均オゾン全量は、参照値（オゾン層破壊が進み、オゾン全量が少ないレベルで推移している近年（1994～2008年）の累年平均値）との比較では、全ての月で並であった（図 II 3-3）。

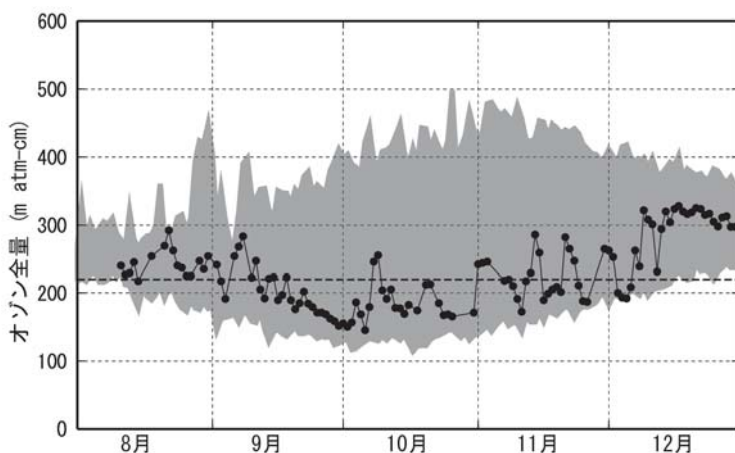


図 II 3-2：南極昭和基地におけるオゾン全量日代表値
(2010年8月～12月)

●は2010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。横破線はオゾンホールの目安である220m atm-cmの値。

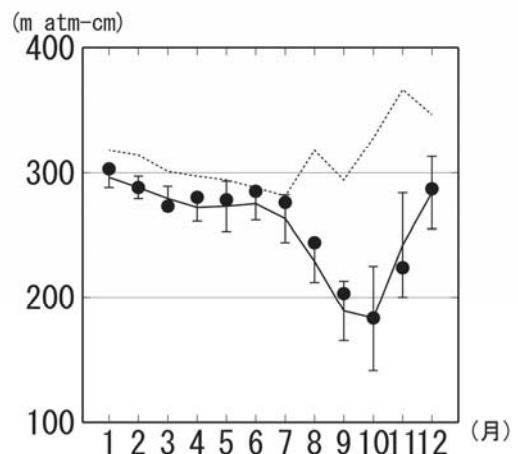


図 II 3-3：南極昭和基地における月平均オゾン全量の年変化（2010年）

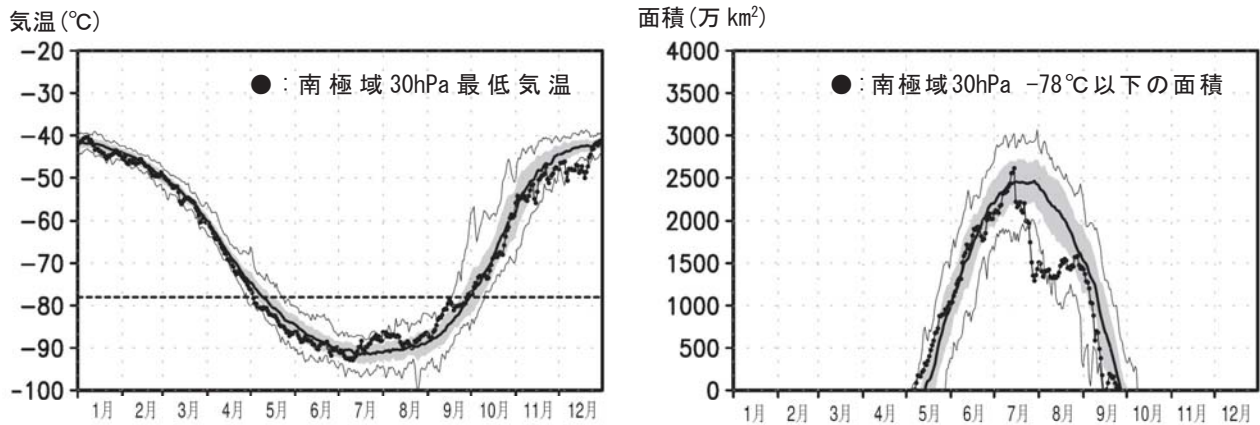
●印は2010年の月平均値。折線（実線）は1994～2008年の累年平均値で、縦線はその標準偏差である。点線はオゾンホールが出現する以前の1961～1980年の累年平均値。

2010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（解説7）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°C 以下であることから、気象庁では南半球30hPa面の -78°C 以下の面積を監視している。図II-3-4に2010年の南緯60度以南における30hPa面の領域最低気温（左）、および -78°C 以下の面積の年変化（右）を示す。ここでは1979～2009年の累年平均値を過去の平均として比較を行う。

2010年の南極域の30hPaの日別の領域最低気温は、5月から -78°C 以下となり、5月から7月中旬まではほぼ平均程度で推移した。7月中旬から気温が上昇し、7月下旬から8月上旬にかけて平均より高かった。その後、9月中旬に平均より高くなったが、11月からは平均を下回り、12月半ば頃には過去の最低値を下回った。12月下旬には気温が上昇し平均程度に戻った。 -78°C 以下の面積の推移をみると、6月から7月上旬までは平均程度で推移していたが、7月中旬に面積が急速に縮小し8月中旬までは平均より小さくなった。7月下旬は過去の最小値を下回った。9月初めに一時的に平均程度に戻ったが、その後9月中旬にかけて平均より小さくなった。

2010年のオゾンホールの規模は、1990年以降で年最大面積が3番目に小さく、年最大オゾン欠損量は4番目に小さかった。この理由として、極域成層圏雲が出現する目安となる -78°C 以下の面積の領域が、7月中旬から8月中旬にかけて過去の平均より小さくなったため、この時期とその後の南極域上空でのオゾン層の破壊が少なかったと考えられる。一方、11月～12月中旬までは、オゾンホールの規模は過去の同時期よりも大きく推移した。これは、南極域上空の成層圏の気温は既に春に向かって -50°C 程度に達していたが、この時期の過去の平均より低く、南極上空の極渦は例年より強い状態で維持されたことから、オゾンホール周囲のオゾン濃度の高い空気塊との混合が例年と比べ不活発であったためと考えられる。



図II-3-4：南極域上空の下部成層圏の最低気温（左）および気温が -78°C 以下の領域の面積（右）の年変化（2010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（左）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年変化（右）。●印は2010年の値を示す。陰影中の実線は1979～2009年の累年平均値。陰影の外の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。左図中の横の破線は極域成層圏雲出現の目安である -78°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。

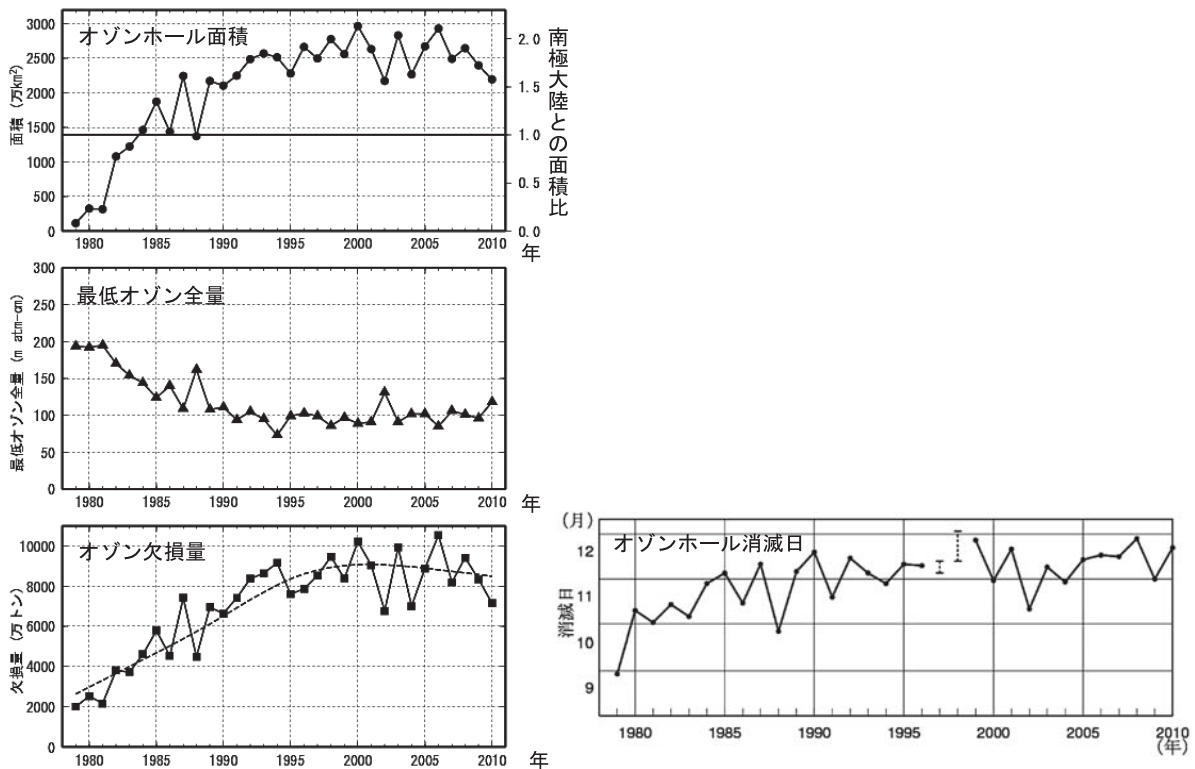
3-2 南極オゾンホール

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（破壊量）の年最大値、および最低オゾン全量の年最小値の経年変化を図Ⅱ3-5（左の上中下図）に示す。これをみると、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。南極域上空のオゾン破壊量を示す年最大オゾン欠損量に対するEESCフィッティング曲線を図Ⅱ3-5左下図に示す。オゾンホールの規模の変動は、成層圏におけるオゾン層破壊物質の濃度の指標であるEESCの変化に対応して変化していることがわかる。

オゾンホールの規模には、EESCの変化にともなう長期的な変化のほかに年々変動がみられる。特に、2000年以降は、年々変動による増減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大気の変動であり、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ホールの破壊が緩和された（「解説8」参照）。

図Ⅱ3-5右に、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、2010年の消滅日は12月22日と遅かった。



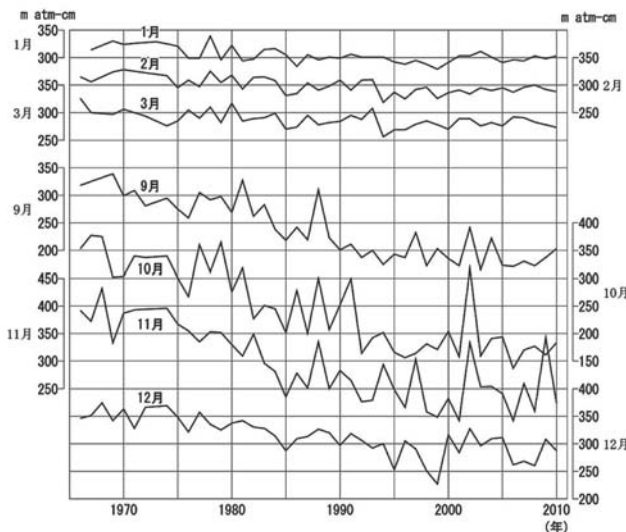
図Ⅱ3-5：オゾンホールの規模と消滅日の経年変化

（左図）1979～2010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の変化。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）。欠損量の図の点線は、EESCフィッティング曲線を示す。（右図）1979～2010年の220m atm-cm以下の領域が消滅した時期の経年変化。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、破線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

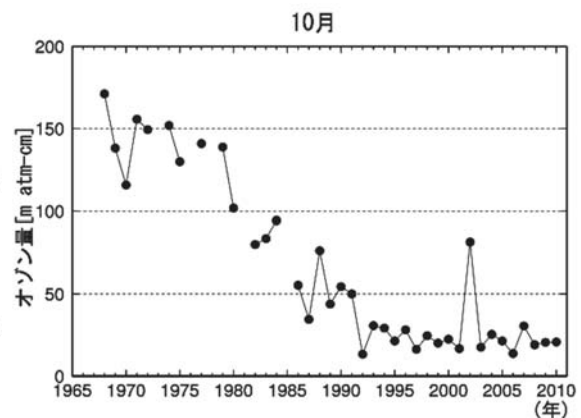
南極昭和基地における春～秋季にかけての月平均オゾン全量の経年変化を図Ⅱ3-6に示す。オゾンホール時期にあたる9～12月のオゾン全量が、1980年頃から長期的に減少しているのがわかる。昭和基地でのオゾン量の変化が必ずしもオゾンホールの規模の変化をそのまま反映しているわけではないが、昭和基地上空はオゾンホールの縁辺となることが多く、オゾンホールの規模の目安となっている。9～11月までの時系列において、2002年にオゾン全量が急増している。これは、前頁で述べた2002年9月に発生した南極域の成層圏突然昇温がもたらした、成層圏の気温が過去50年で最高となるような特異な気象条件に対応している、昭和基地も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、2010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。

図Ⅱ3-7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もよい指標になる。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、これはピナトゥポ火山噴火（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（「解説7」参照）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。なお、2010年10月のこの高度におけるオゾン量は、2009年と同様、1990年代後半と同程度だった。



図Ⅱ3-6：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（季節変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）。



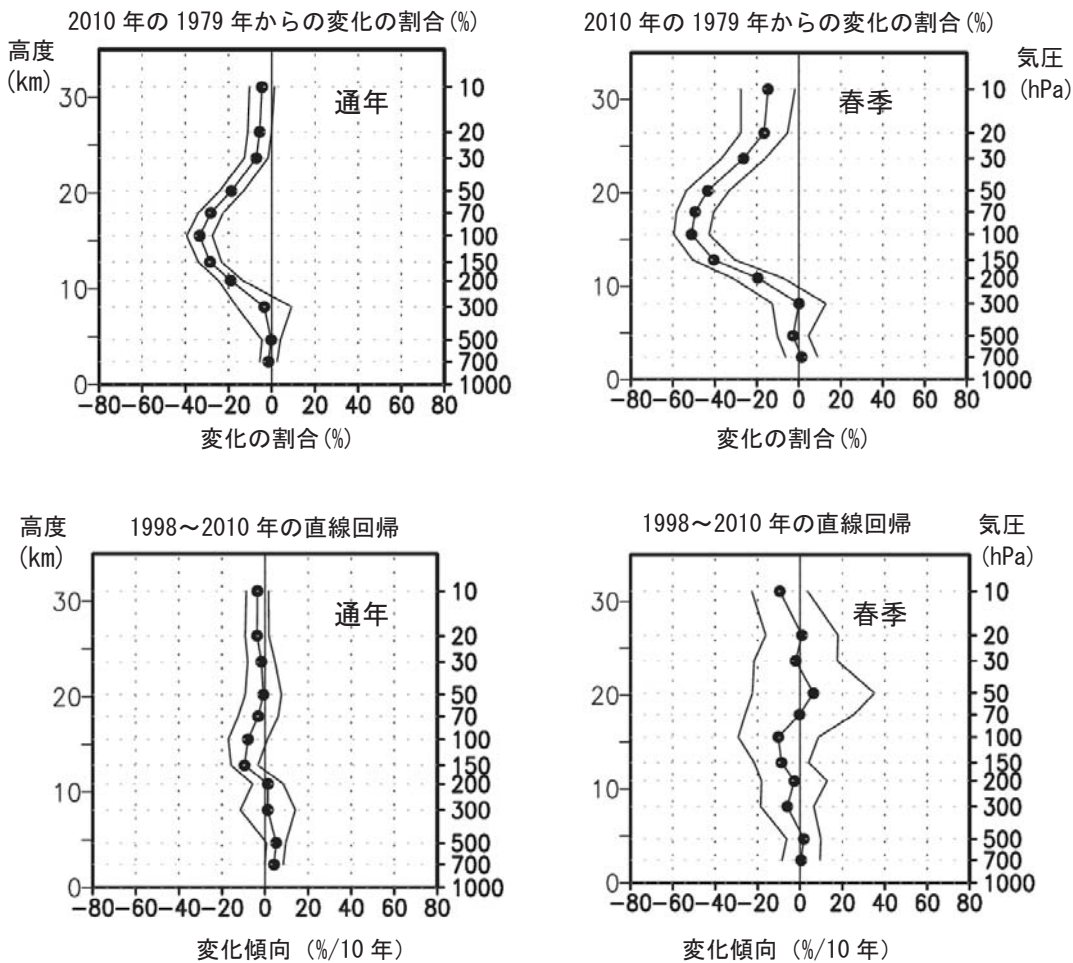
図Ⅱ3-7：南極昭和基地上空（高度12～20km）の10月の月平均オゾン量の経年変化

この図の値は、観測値をそのまま使用した（季節変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、2010年のオゾン分圧の1979年からの変化の割合(%)の高度分布を図II 3-8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、季節変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EESCフィッティングを適用して求めた値である。これを見ると、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、1998~2010年のデータから直線回帰により求めた変化傾向を図II 3-8下段に示す。通年、春季ともに特に顕著な傾向はみられず、オゾン分圧が低い状態が続いている。



図II 3-8：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EESCフィッティングによる2010年のオゾン分圧の1979年からの変化の割合(%)。下段は1998~2010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)は月別値から、右(春季)は9~11月の値から求めた変化傾向。

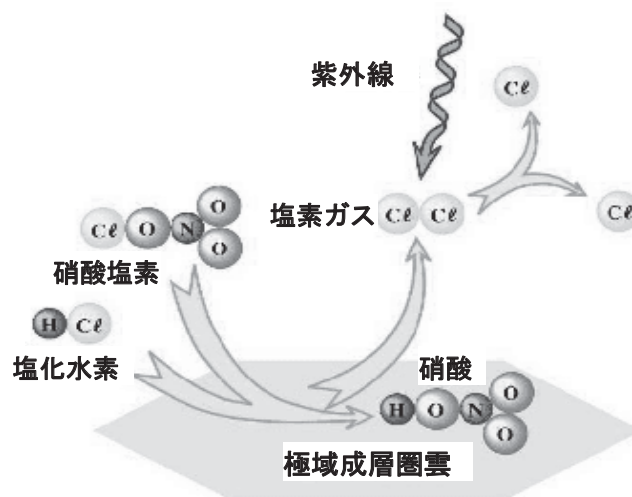
解説7 南極でオゾンホールが発生するメカニズム

地上で放出されたクロロフルオロカーボン類（CFC類）等は、上部成層圏（高度40km付近）において太陽紫外線により分解され、この反応によって塩素原子が生じる。この塩素原子が触媒となって、上部成層圏でオゾンを連鎖的に破壊する。塩素原子は、その後下部成層圏にも輸送されるが、そこでは塩化水素（HCl）、硝酸塩素（ClONO₂）といった、それ自体はオゾン破壊作用の無い比較的安定な化合物に変化し、通常は直接オゾンを破壊することはない。

ところが、極域では冬季から春季にかけての特有の気象条件によって、下部成層圏でもオゾン破壊が起こる。そのメカニズムは以下のとおりである。

極域では冬季、成層圏に形成される極渦（極夜渦ともいう）により、極域上空とその周囲との空気の交換が著しく制限され、極域上空の成層圏大気は周囲から孤立する。冬季は太陽光が当たらないため、極渦の内部は放射冷却により著しく低温になる。成層圏の気温が低下すると、極域成層圏雲（Polar Stratospheric Clouds；PSCs）と呼ばれる微細な粒子からなる雲が成層圏に形成される。極域成層圏雲は、硝酸や水蒸気などが低温で凝結した液相や固相の粒子から形成され、大きく分けて下部成層圏の気温がおよそ-78℃以下で発生するタイプⅠのものとおよそ-85℃以下で発生するタイプⅡのものがある。前者には硝酸が多く含まれるのに対し、後者は氷晶（H₂O）が主成分であると考えられている（WMO,1999）。極域成層圏雲が発生すると、その粒子の表面では不均一反応^{注）}により、成層圏の塩素の大部分を占める硝酸塩素（ClONO₂）や塩化水素（HCl）から、塩素分子（Cl₂）などが生成され、冬季の間に極渦内に蓄積される（WMO, 1995）。そして、春季になって極域上空の成層圏に太陽光が戻ってくると、冬に蓄積された塩素分子などが光によって解離して活性塩素原子となる。これが触媒となって働き、オゾンを破壊する。オゾンホールは、南極域でこのメカニズムによる急激なオゾン破壊が進むことによって形成されるものである。このように、オゾンホールの形成は極渦の状況と密接に関係している。このため、極渦の年々変動にもなってオゾンホールの規模にも年々の変動が生ずる。

注） 不均一反応：気体分子が固体または液体の表面で起こす反応など、異なる相の間で起こる化学反応。異相反応ともいう。



図E7-1：極域成層圏雲によるオゾン破壊のメカニズムの模式図