

2 - 3 南極域上空のオゾン層

2 - 3 - 1 南極オゾンホール

1980年代初め頃、春季の南極域上空のオゾン全量は、それまでと比較すると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。これは後にオゾンホールと呼ばれるようになった現象である。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。オゾンホールの面積は、オゾン全量が220m atm-cm以下の領域の面積、最低オゾン全量はオゾンホール内のオゾン全量の最低値、オゾン欠損量は、オゾンホール内のオゾン全量を300m atm-cm(オゾン全量の全球平均値)に回復させるために必要なオゾンの質量をいう。

ここでは、南極昭和基地におけるドブソン計によるオゾン全量とオゾンゾンデによるオゾン高度分布、他国の南極観測基地におけるドブソン計等によるオゾン全量及びアースプローブ衛星に搭載されているTOMSによるオゾン全量等のデータを基に、2003年の南極域上空のオゾン層の状況について述べる。

2 - 3 - 2 南極昭和基地での観測

2003年の昭和基地上空の月平均オゾン全量については、1年を通してオゾンホールが明瞭に現れる以前の平均値(参照値)より少なく、4月以降は10%以上少なくなり、6月と9月の月平均としては過去最も少なかった(図2-2-1)。

図2-3-1は昭和基地で観測したオゾン全量の日代表値の変化を示している。2003年は、8月中旬にオゾンホールの目安である220m atm-cm以下の値を観測した後、9月から10月にかけて過去最低レベルで推移し、11月に入ると一時的に大きな値が観測されるようになり、11月下旬からは継続して220m atm-cmを上回って推移するようになった。

図2-3-2は、2003年の9月から12月までの個々のオゾンゾンデ観測で得られた高度分布(上段)及びその月平均高度分布(下段)を示している。それぞれの図には参照値としてオゾンホールが明瞭に現れる前の1968~1980年の月平均高度分布を示している。図には示さないが、8月下旬に高度18~22km付近(40~20hPa)でオゾン分圧の低い領域が現れはじめ、9月に入るとさらに低い高度14~17km付近にもオゾン分圧の低い領域が見られるようになった。9月下旬から10月にかけて全ての観測で14~20km(100~50hPa)

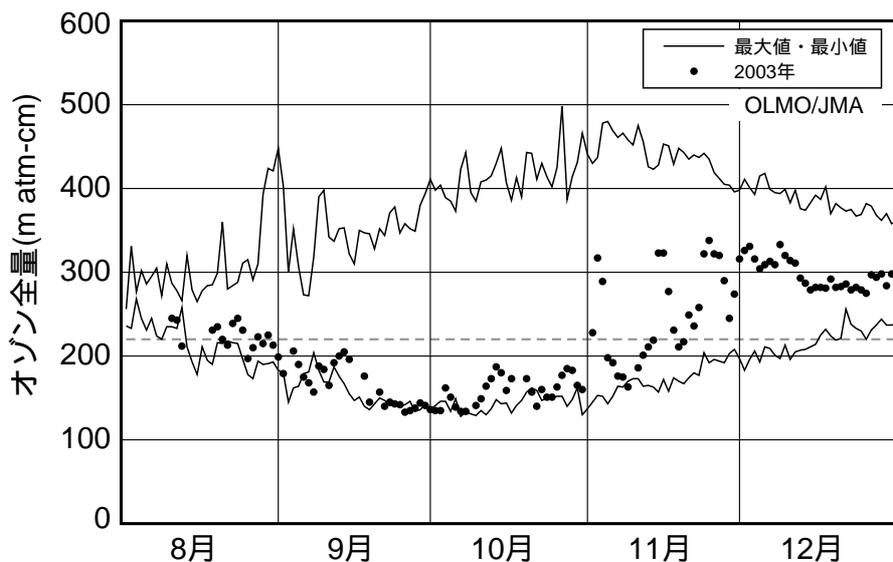


図2-3-1: 南極昭和基地におけるオゾン全量の推移

図中の細実線は観測開始(1961年)以来のオゾン全量観測値(日代表値)の最大値及び最小値、●は2003年の観測値。図中の点線はオゾンホールの目安である220m atm-cm。

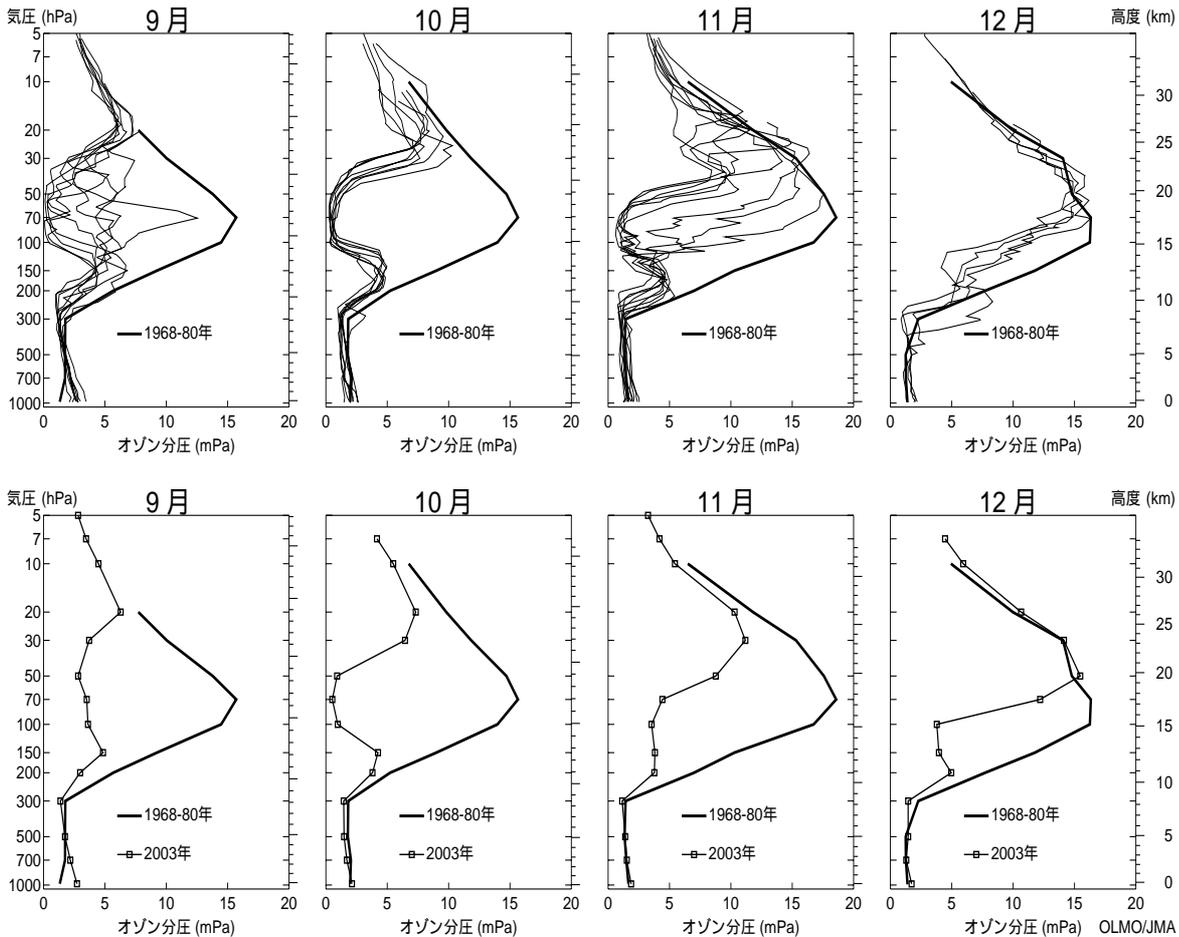


図2 - 3 - 2 : 南極昭和基地におけるオゾン高度分布

2003年9～12月のオゾンゾンデ観測結果。上段：太実線はオゾンホールが出現する以前（1968～1980年）の平均オゾン高度分布。細実線は2003年の個々の観測結果。下段：太実線は上段に同じ。---は2003年の月平均オゾン高度分布。

付近のオゾン分圧はほとんど0になっている。11月も参照値より低い状況が続いたが、高度20km(50hPa)以上で参照値並の値となった日もあった。12月には20km(50hPa)以上で参照値並の値となったが、それ以下の高度では低い状態が続いた。

図2-3-3に、昭和基地での2003年のオゾンゾンデ観測を基にしたオゾン分圧高度分布の推移を示す。オゾン分圧は通常、高度14～20km(100～50hPa付近)で最も高くなる。2003年の1～8月中旬までは、この付近のオゾン分圧はほぼ10mPa以上であったが、8月中旬以降、この高度のオゾン分圧は低下し、9月下旬から11月下旬にかけて極めて低い分圧が観測された。低いオゾン分圧の中心は9月中旬の18km付近から11月には14km付近へと移動している。11月はじめから高度20～22kmを中心にオゾン分圧の高い領域が見られ、これに伴ってオゾン全量も回復している(図2-3-1参照)。

気象庁では1997年より、オゾン層破壊に密接に関係するエアロゾル(大気浮遊微粒子、エアロゾルともいう)の観測をゾンデを用いて昭和基地で実施している。図2-3-4に2003年7月25日に観測されたエアロゾル及び気温の高度分布を示す。これによると、高度14～26kmで-80以下となっており、高度14～17km及び高度21～22kmで極域成層圏雲と見られる高濃度のエアロゾルを観測している。

2 - 3 - 3 各国基地での観測

図2-3-5は、昭和(日本)、ハレー(英国)、ベルナドスキ(ウクライナ)/ファラデー(英国)、ロゼラ(英国)及びアライバルハイツ(ニュージーランド)の各南極観測基地における2003年8～12月のオゾン全量の日々の観測値を表示したものである。各観測地点のオゾン全量を見ると日々大きく変動している。こ

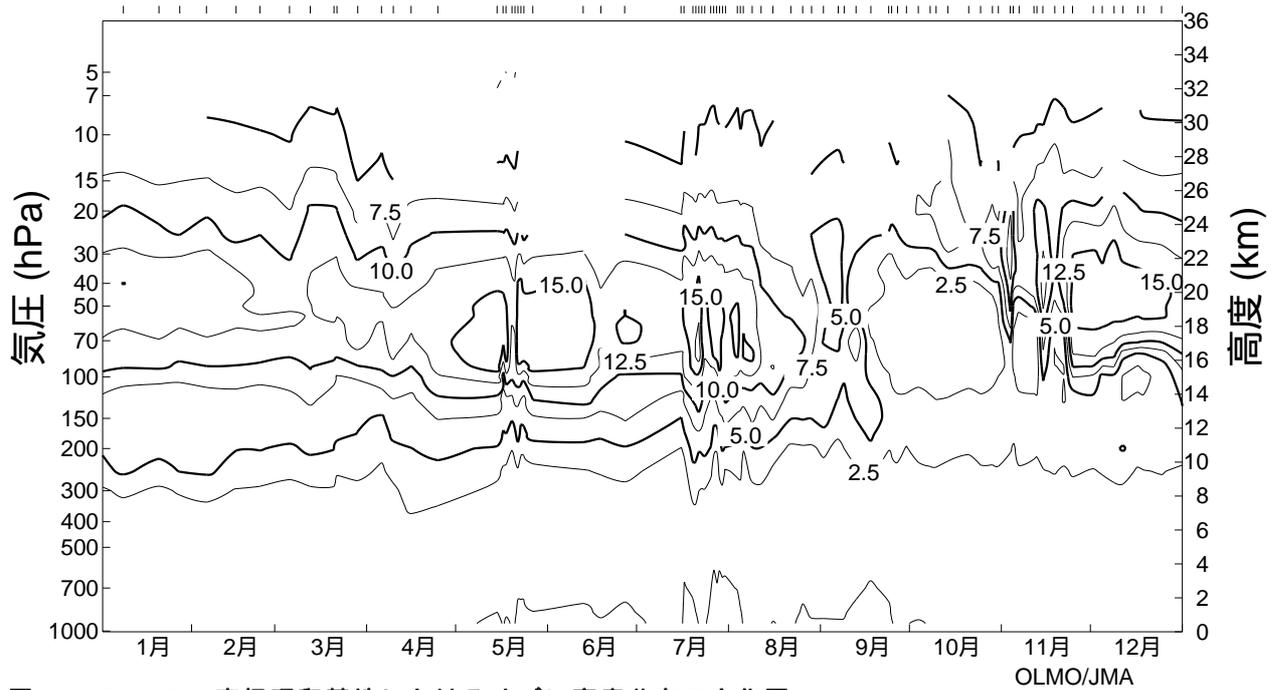


図 2 - 3 - 3 : 南極昭和基地におけるオゾン高度分布の変化図

南極昭和基地のオゾンゾンデ観測結果に基づく 2003 年のオゾン分圧の高度分布の変化。等値線は 2.5mPa 毎。

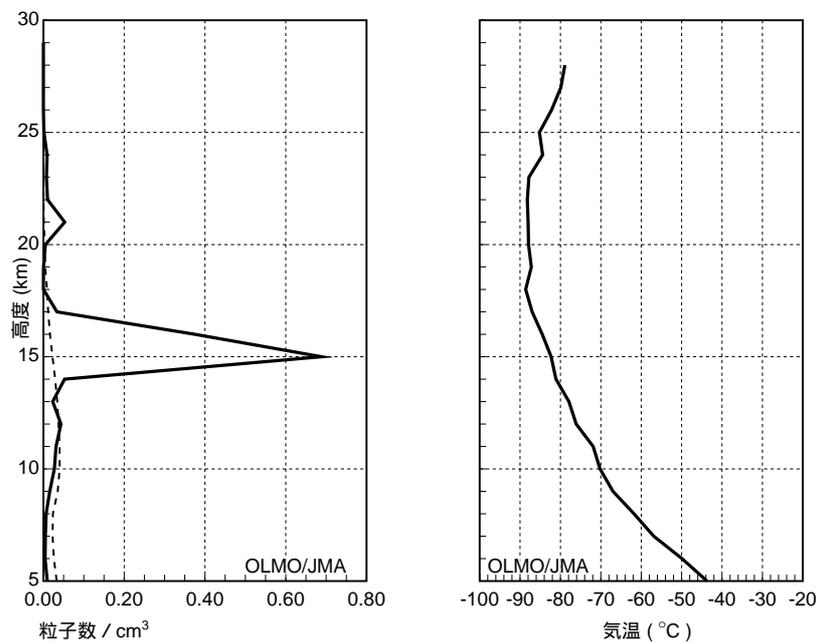


図 2 - 3 - 4 : 南極昭和基地におけるエアロゾルゾンデ観測結果

南極昭和基地におけるエアロゾルゾンデ観測によって得られた上空のエアロゾル及び気温の高度分布。左図は直径0.8 μm 以上のエアロゾルの個数密度で、実線は 2003 年 7 月 25 日の観測結果、破線は 1997 ~ 2002 年の観測のうち極域成層圏雲が出現しない時期の平均。右図は 2003 年 7 月 25 日の気温の分布。

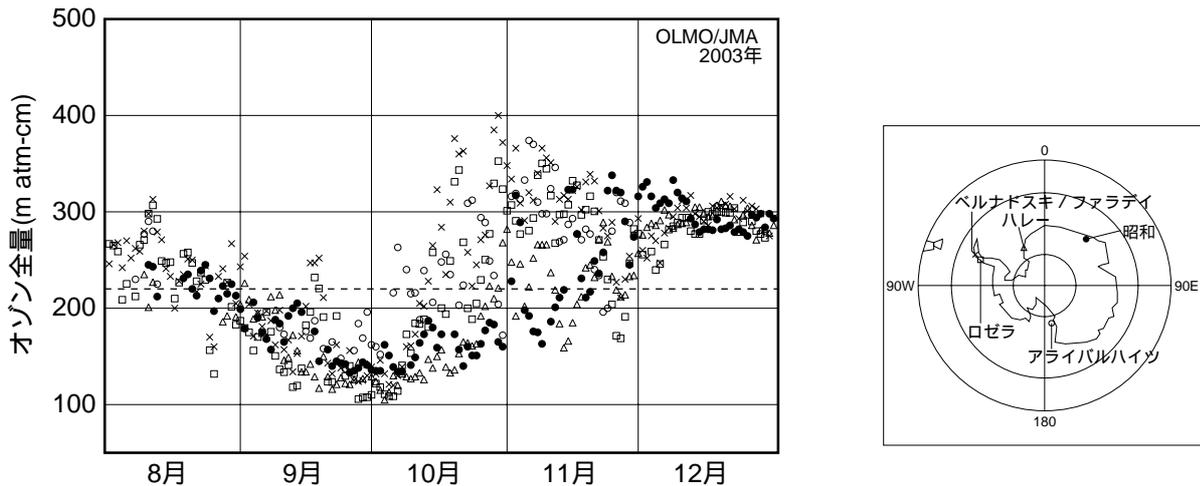


図2 - 3 - 5 : 南極各基地におけるオゾン全量の変化

昭和 (印) ハレー (印) ベルナドスキ/ファラデイ (×印) ロゼラ (印) 及びアライバルハイツ (印) における2003年8～12月のオゾン全量。アライバルハイツの12月は測器の較正点検のため観測できなかった。ハレー、ベルナドスキ/ファラデイ、ロゼラの観測値はShanklin 博士(英国南極研究所)提供。アライバルハイツの観測値はClarkson 博士(ニュージーランド水・大気研究所)提供。

れはいずれの観測地点も南極大陸の沿岸部に位置し、通常内陸部に中心を持つオゾンホールの変形・移動に伴って、オゾンホールの中に入ったり外に出たりを繰り返していたからと考えられる。しかし、いずれかの観測地点はオゾンホール内に位置している場合が多いので、各観測地点のデータでオゾン全量の少ない側の境界をたどることにより、オゾンホール内のオゾン全量の推移の概要を把握することができる。

2003年のオゾン全量はロゼラで8月上旬に220m atm-cm以下の値が観測され、全観測地点で9月後半から10月上旬にかけて最も減少し、ロゼラやハレーでは100m atm-cmに近い値を記録した。しかし、10月以降、急激なオゾン全量の増加が見られるようになり、ベルナドスキ/ファラデイ、ロゼラやアライバルハイツでは10月中旬に300m atm-cmを超えた。その後、一時的に220m atm-cmを下回ることもあったが、11月下旬から一部を除き220m atm-cmを上回るようになった。昭和基地上空のオゾン全量は11月上旬に、ハレーでは11月下旬に220m atm-cmを超えた。各基地のオゾン全量の変動は変形したオゾンホールの変動に対応している。オゾンホールの形状は極渦の形状にほぼ一致することから、オゾンホールの日々の変動を知るためには極渦の動きを把握することが重要である。

極渦境界線と各観測点の位置関係を定量的に把握するために等価緯度による解析手法が用いられる(Hirota他、2003)。一般に、渦の強さは渦位を使って表現される。風は渦位の等値線にほぼ沿って流れ、極渦の中心では渦位が最大となる。ある地点の等価緯度とは、その地点の渦位よりも大きな渦位を持つ領域の面積と、その等価緯度円内の領域の面積が等しくなるような仮想上の緯度である。一般的に極渦の縁部では周囲より風速が大きくなっている。ここでは風速が最大となる位置を極渦境界線と定義し、その等価緯度と観測所の等価緯度を比べることで、極渦に対する観測所の相対的な位置を見る指標とする。図2-3-6には、南極各基地について、日々のオゾン全量と、温位高度475K(高度20km付近)の極渦境界線と観測所の等価緯度の差を示した。等価緯度の差が負になっているときには基地が極渦の内部に位置していることを意味している。オゾン全量と等価緯度の差の変動は数日程度であれば概ね同期して変動している。また、基地によっては220m atm-cm以下のオゾンホールの中にある時期は、極渦に覆われた時期におおよそ対応している。

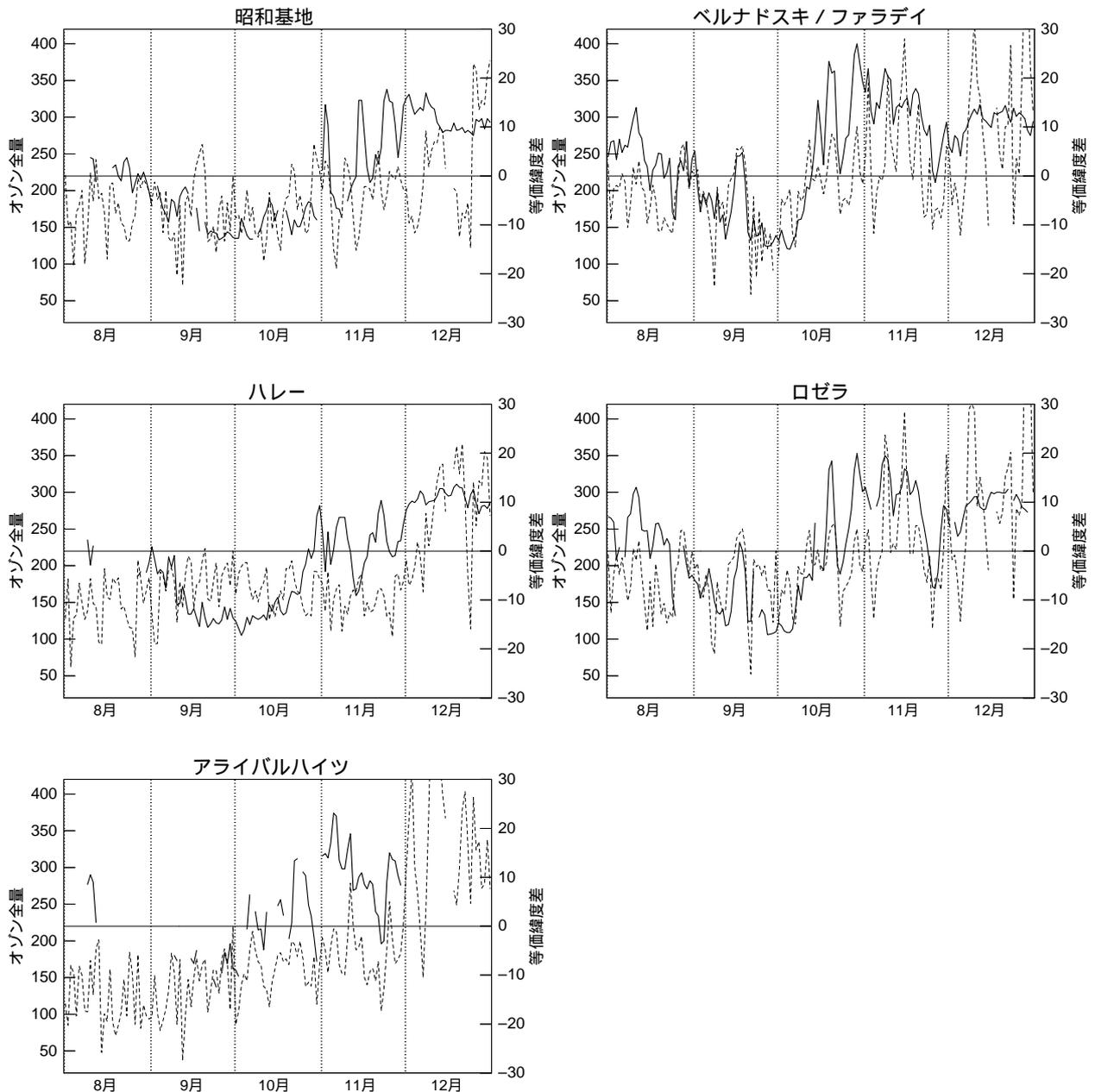


図 2 - 3 - 6 : 南極各基地におけるオゾン全量の変化及び温位高度 475 K での極渦境界線との等価緯度の差の変化

昭和、ハレー、ベルナドスキ/ファラデイ、ロゼラ、アライバルハイツにおける 2003 年 8 ~ 12 月のオゾン全量(実線)及び極渦境界線に対する等価緯度の差(点線)を示す。等価緯度の差が負の時は基地が極渦内部にあることを示す。アライバルハイツの 12 月は測器の較正点検のため観測できなかった。ハレー、ベルナドスキ/ファラデイ、ロゼラの観測値は Shanklin 博士(英国南極研究所)提供。アライバルハイツの観測値は Clarkson 博士(ニュージーランド水・大気研究所)提供。

2 - 3 - 4 衛星による観測

図 2 - 3 - 7 にアースプローブ衛星の TOMS により観測した 8 月から 12 月までの南半球の旬別オゾン全量分布図を示す。なお、観測には太陽光を用いることから、極夜のため観測データが取得できない領域がある。このため地上観測ではオゾンホールを目安となる 220m atm-cm を下回るデータが観測されていても、図には現れていない場合がある。この図によると、オゾンホールは 8 月下旬から 9 月中旬にかけて南極点付近に中心があり、また、9 月では月を通して南極大陸全体を覆っていたことが分かる。10、11 月になると、オゾンホールの中心は南極点から昭和基地の方向に移動して、規模は縮小した。図には示さないが日々のオゾン

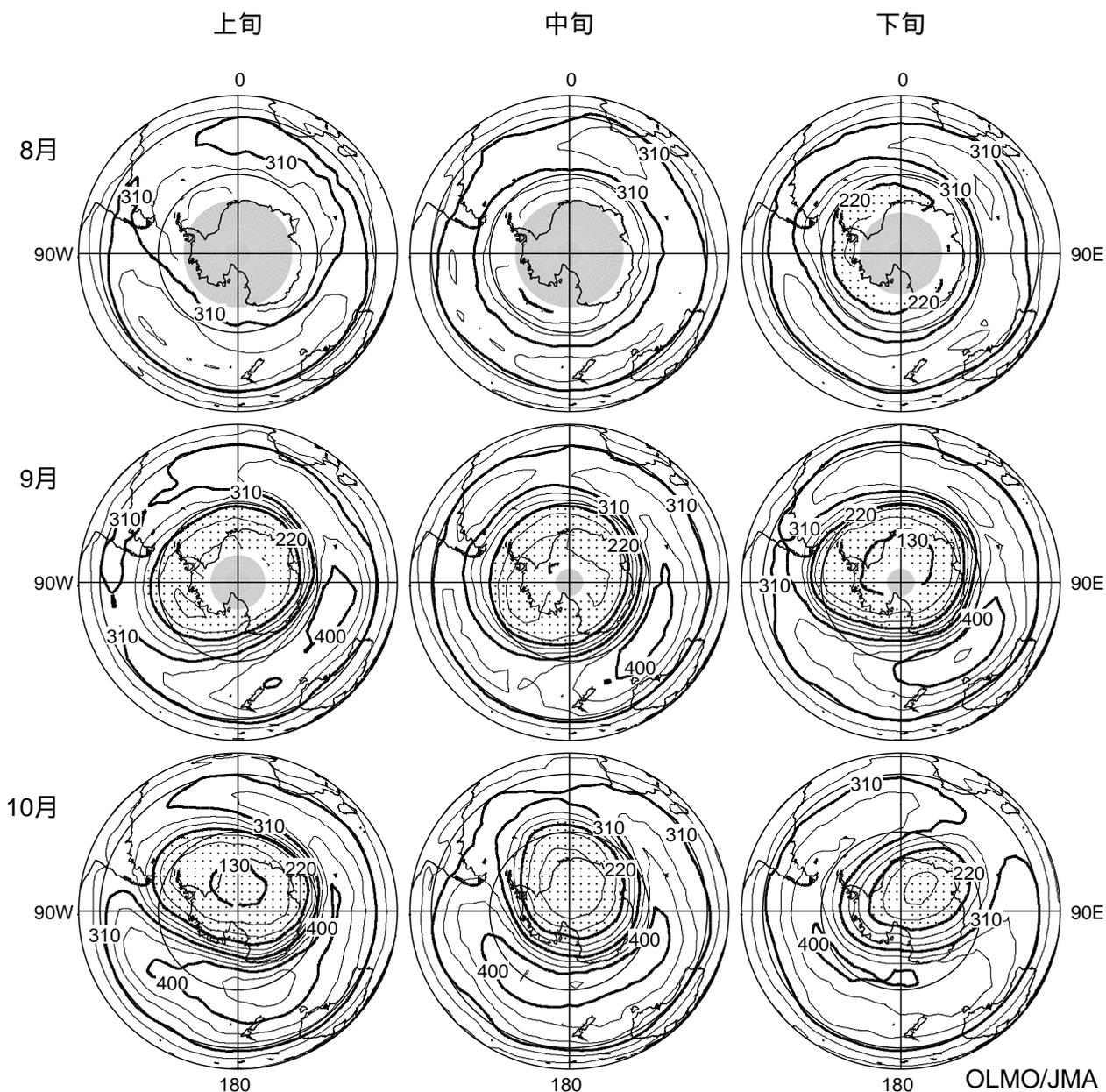


図2 - 3 - 7 (1): 2003年8月から12月の旬平均オゾン全量の南半球分布図(8~10月)

上段から8月、9月、10月の旬平均値。左の列は上旬、中央は中旬、右の列は下旬。点域は220 m atm-cm以下の領域。陰影部は太陽高度角の関係で観測できない領域。等値線間隔は30m atm-cm 毎。NASA 提供のTOMS データを基に気象庁で作成。

ホールの状況を見ると11月に入ってからオゾンホールは縮小して南極大陸上を大きく移動したため、図2 - 3 - 7の11月下旬以降の旬平均図には220m atm-cm以下の領域が現れていない。

図2 - 3 - 8にTOMSの日別値から求めたオゾンホールの規模の変化を示す。この図によると、2003年のオゾンホールは8月下旬に急速に拡大し、9月24日に2003年の最大面積(2,868万km²、過去2位)を記録しその後は急速に規模が縮小して12月8日に消滅した。

オゾン欠損量(破壊量)も、面積同様の推移を示し、2003年のオゾン欠損量の最大値は9,960万トン(9月25日、過去最大。これまでの最大値は2000年の9,622万トン)であった。2003年の最低オゾン全量は、9月28日に97m atm-cmを記録した。このように、2003年のオゾンホールは面積、欠損量ともに過去最大級であった。

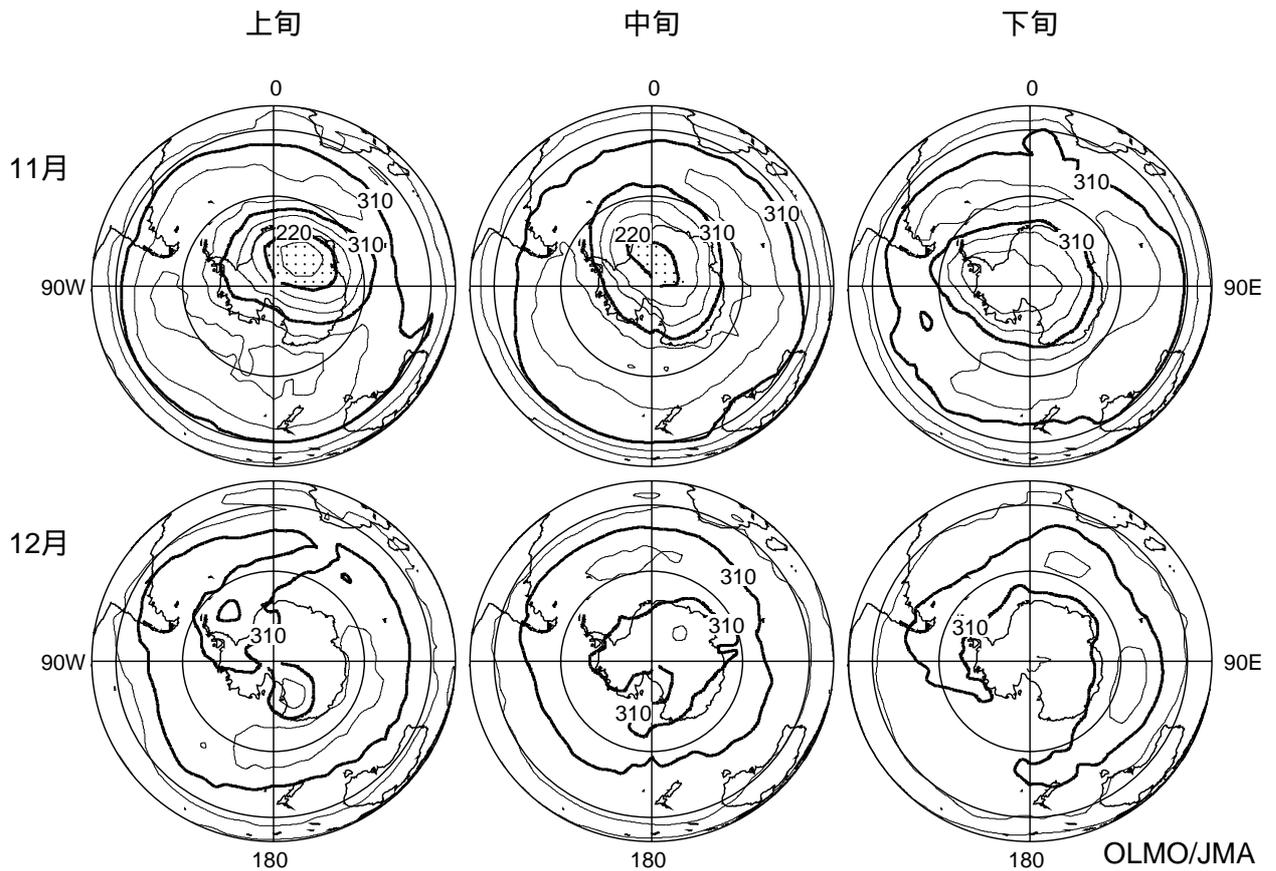


図 2 - 3 - 7 (2) : 2003 年 8 月 から 12 月 の 旬 平 均 オ ゾ ン 全 量 の 南 半 球 分 布 図 (11 ~ 12 月)

上段から 11 月、12 月の旬平均値。左の列は上旬、中央は中旬、右の列は下旬。点域は 220 m atm-cm 以下の領域を示す。等値線間隔は 30m atm-cm 毎。NASA 提供の TOMS データを基に気象庁で作成。11 月 27 日から 12 月 3 日まで、機器の不具合により TOMS データは得られていない。

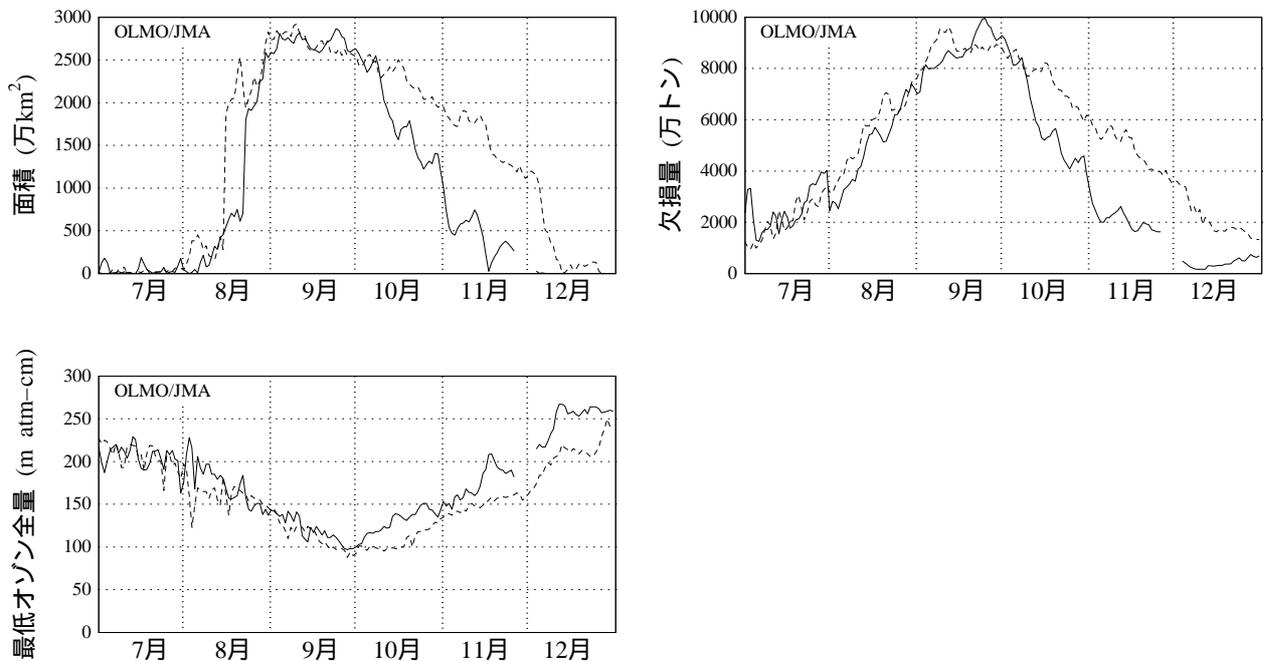


図 2 - 3 - 8 : オゾンホール の 規 模 の 変 化

実線は 2003 年 の 値、破線は 1978 ~ 2002 年 の 観 測 の 中 で の 最 大 値 (面 積、欠 損 量) 及 び 最 小 値 (最 低 オ ゾ ン 全 量)、NASA 提 供 の TOMS データを基に気象庁で作成。11 月 27 日から 12 月 3 日まで、機器の不具合により TOMS データは得られていない。

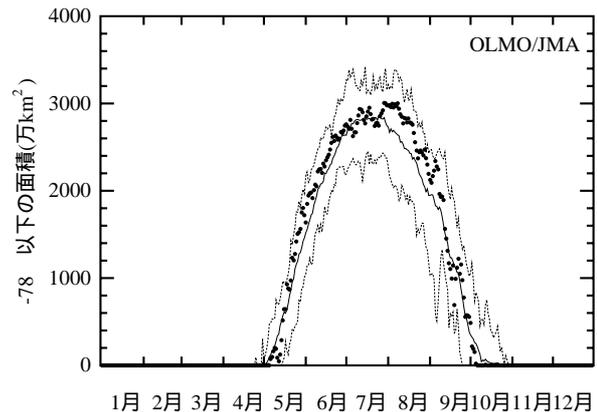
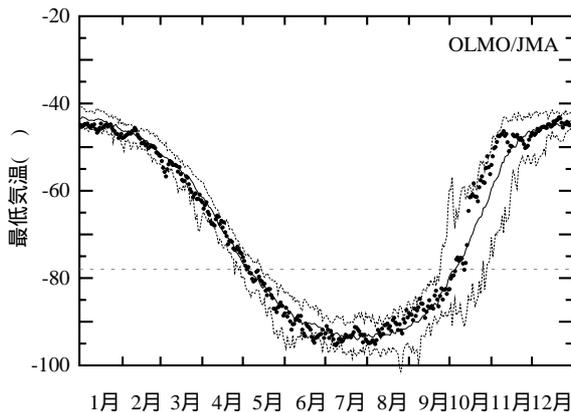


図 2 - 3 - 9 : 南極域上空の下部成層圏の最低気温及び気温が - 78 以下の領域の面積の推移
 南緯 60 度以南の 30hPa(高度約 24km)面における日別の最低気温の推移(左図)及び極域成層圏雲の出現する目安となる - 78 以下の領域の面積の推移(右図)。印は 2003 年の値、実線は 1988 ~ 2002 年の累年平均値、破線は同期間の最低気温(面積)の最高値(最大値)及び最低値(最小値)。

2 - 3 - 5 下部成層圏の気象状況

オゾンホールを発達させる気象要因として、南半球の冬から春にかけて極渦が安定し、低温が持続することが挙げられる。特に、30hPa面の - 78 以下の面積は、オゾンホールの発達と関連が大きい(気象庁、1993)。図 2 - 3 - 9 に気象庁で作成した 2003 年の全球の解析データによる南緯 60 度以南の下部成層圏(30hPa 面)の最低気温、及び極域成層圏雲出現の目安である - 78 以下の面積の推移を示す。通常、南極周辺の 30hPa 面の最低気温は、5 月頃に - 78 より低くなり始め、7 ~ 8 月に最も低くなり、10 月に - 78 を上回る季節変化を示す。2003 年の 5 ~ 10 月の南極域の最低気温は 6 ~ 7 月の一時期に累年平均(1988 ~ 2002 年の平均)を下回ったことを除けば、累年平均並かこれを上回って経過した。しかし、- 78 以下の領域の面積(図 2 - 3 - 9 右図)を見ると、5、7 月の一時期と 9 月下旬以降を除けば、累年平均を上回ることが多く、特にオゾンホールが発生し発達する 7 月下旬から 9 月中旬にかけて大きく上回った。ここでは示さないが、9 月上旬までは例年に比べて極渦の形が円形に近く、安定していたことが広い低温域を作ったと考えられる。なお、10 月以降は極渦の形は変形し不安定になった。

2 - 3 - 6 2003 年の南極オゾンホールの特徴

以上の観測結果から、2003 年の南極オゾンホールの特徴をまとめると次のようになる。

2003 年のオゾンホールの特徴は、面積が過去 2 位、欠損量(破壊量)が過去最大であり、例年よりも発達時期が早かったことである。

このような特徴をもたらした原因として、7 月下旬から 9 月上旬にかけて極渦が安定しており、極域成層圏雲が広い範囲で発生しやすかったことが挙げられる。また、オゾンホールが 10 月から急速に縮小した理由については、10 月以降の成層圏では極渦が不安定で、オゾンホール内のオゾン濃度の低い空気塊が低緯度の空気塊と混合しやすい状況であったことが挙げられる。

(解説) オゾン破壊のメカニズム

地上で放出されたクロロフルオロカーボン類(CFCs)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塩素原子となる。この塩素原子が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、硝酸塩素といった準安定な物質に変化し、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通りである。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(PSCs: Polar Stratospheric Clouds)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縮した液相や固相の粒子として形成され、大きく分けて下部成層圏の気温が概ね -78 (195K)以下で発生するタイプIのものと、概ね -85 (188K)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(H_2O)が主成分であると考えられている(WMO, 1999)。極域成層圏雲の粒子の表面で起きる不均一反応(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。)により、成層圏の塩素の大部分を占める硝酸塩素($ClONO_2$)や塩化水素(HCl)といった、それ自体はオゾン破壊作用のない化合物から塩素分子(Cl_2)などが発生する(WMO, 1995)。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から光解離した活性塩素原子が触媒的にオゾン破壊を開始する。オゾンホールは南極域で、このメカニズムによって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。