

ン分圧の季節変化が明瞭である。2001～2002年にかけて4地点に共通した特徴として、2001年のはじめから2002年の10月ころまで、オゾンピークよりやや低い高度（高度約20km付近）を中心に、参照値より低い傾向が見られ、特に札幌、つくば、鹿児島島の3地点では、1～4月に2mPaを超える負の偏差が見られた。また、2002年の方が2001年よりも範囲・偏差の大きさとともに大きかった。特に負の偏差が大きかった2002年1月～2月の各地のゾンデ観測で特徴的なプロファイルを図2-2-3に示す。

上記の高度域のオゾン変動については、成層圏のオゾン輸送に関係する準2年周期振動(QB0)と関連があることが知られている(Hollandsworth et al., 1995)。このため、全年を通じて資料のある1990年1月から2002年12月までについて、QB0の指標であるシンガポール上空50hPa面の東西風(QB0指数)に対する30hPa面のオゾン分圧の偏差の関係を調べてみると、QB0に対して約4ヶ月の遅れで各地点ともオゾン分圧の偏差がよく対応していることが分かった(図2-2-4)。さらに各地点での高度別の変動について、QB0、太陽活動などを説明変数として重回帰解析を行ったところ、図2-2-5に示されるように、30hPaを中心にして低緯度ほどオゾン分圧の偏差とQB0の関連が強いことがわかった。

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。オゾンホールは、クロロフルオロカーボン等から遊離した活性塩素等の増加と、南極域の冬季から春季にかけての特有の気象条件によって、急速なオゾン破壊が下部成層圏で起こる現象である。南極域では冬季、成層圏に形成される極渦（極夜渦ともいう）により、南極域上空とその周囲との空気の交換が著しく制限され、南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(H₂O)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(ClONO₂)や塩化

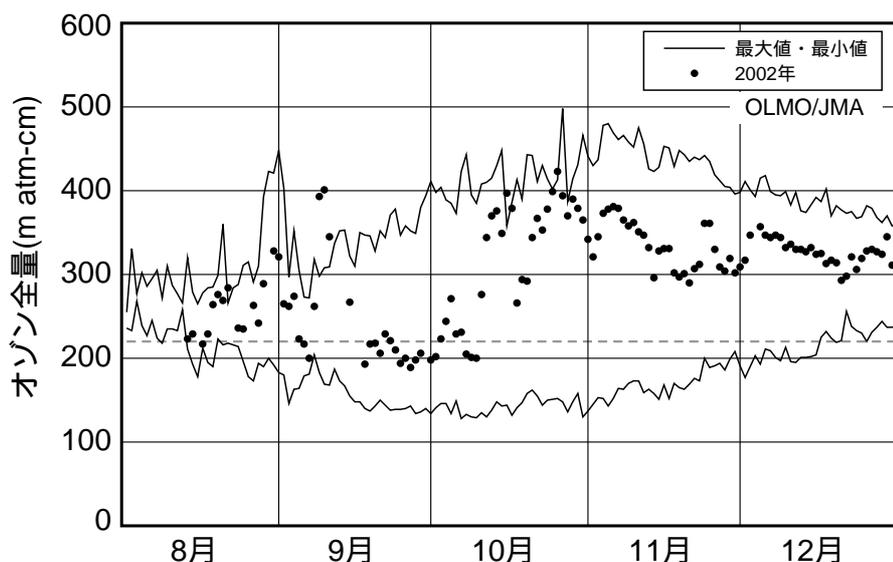


図2-3-1：南極昭和基地におけるオゾン全量の推移

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2002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。

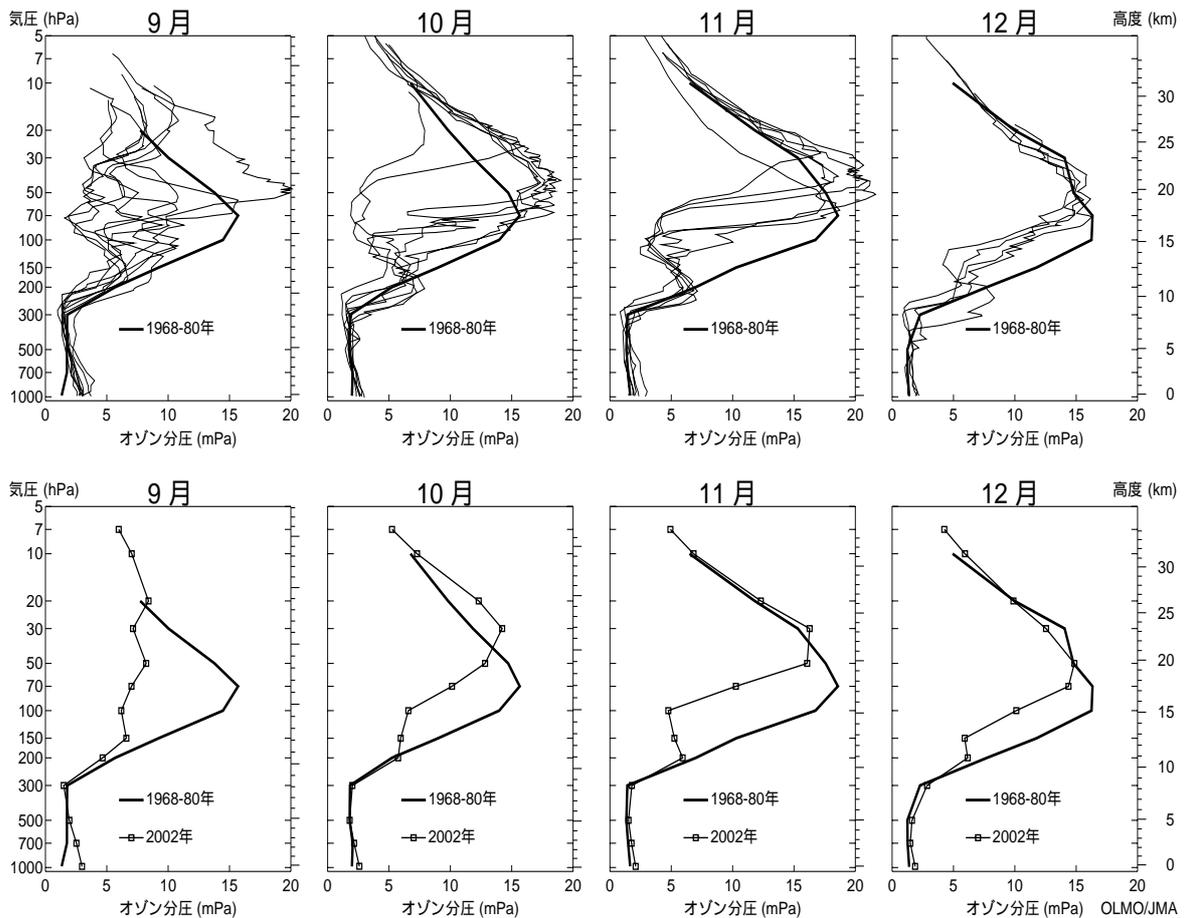


図 2 - 3 - 2 : 南極昭和基地におけるオゾン高度分布

2002 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。上段の細実線は 2002 年の個々の観測結果。下段：太実線は上段に同じ。--- は 2002 年の月平均オゾン高度分布。

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 (Cl₂) などが発生する (WMO, 1995)。春季になって南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し、極渦内にオゾンホールが形成される。

なお、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、オゾン破壊量は、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、2002 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

2002 年の昭和基地上空の月平均オゾン全量については、年の前半は5月を除い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 5 ~ 10% 程度少なかった。5月を除いて1月から9月まではほぼ、オゾンホールがあらわれるようになってからの 20 年間 (1981 ~ 2000 年) の平均値と同じ程度であったが、10月以降については参照値よりは低いものの 1981 ~ 2000 年の平均と比べると多くなっていた (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。2002 年は、8月中旬にオ

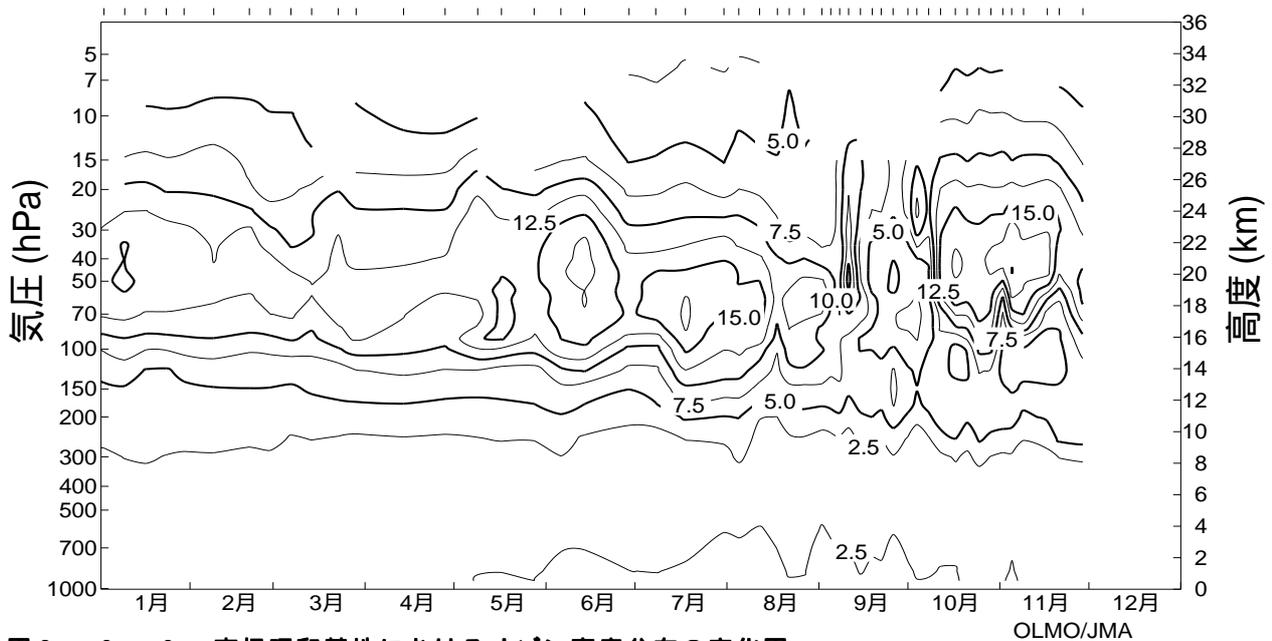


図 2 - 3 - 3 : 南極昭和基地におけるオゾン高度分布の変化図

南極昭和基地のオゾンゾンデ観測結果に基づく 2002 年のオゾン高度分布の変化。等値線は 2.5mPa 毎。

ゾンホールを目安である 220m atm-cm 以下の値を観測した後、9月中旬まで大きく変動し、9月26日に2002年の最低値 189m atm-cm を記録した。10月中旬以降は多めに推移し、10月の月平均としては、この20年間で最も多く、11月、12月も2番目に多かった。

図 2 - 3 - 2 は、2002 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。高度 18km ~ 28km 付近のオゾン分圧が、オゾンホールが分裂・縮小した 9 月末から 10 月にかけて参照値より高い値まで上昇し、12 月までには参照値（1968 ~ 1980 年の平均）並の値となった。しかし、10 ~ 17km の高度のオゾン分圧は低いまま推移した。

図 2 - 3 - 3 に、昭和基地での 2002 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）で最も高い高度分布となる。2002 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 月下旬以降、この高度のオゾン分圧は低下し、9 月下旬に 5mPa 以下の低い分圧が観測された。その後 10 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た。

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）のゾンデ観測を昭和基地で実施している。図 2 - 3 - 4 に、2002 年 8 月 4 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 17km 以上で気温は - 80 以下となっており、高度 17 ~ 18km 付近を中心として、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 2002 年 8 ~ 12 月のオゾン全量の日々の観測値を重ねて表示したものである。各観測地点のオゾン全量は日々大きく変動している。こ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（図 2 - 3 - 6 参照）。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。

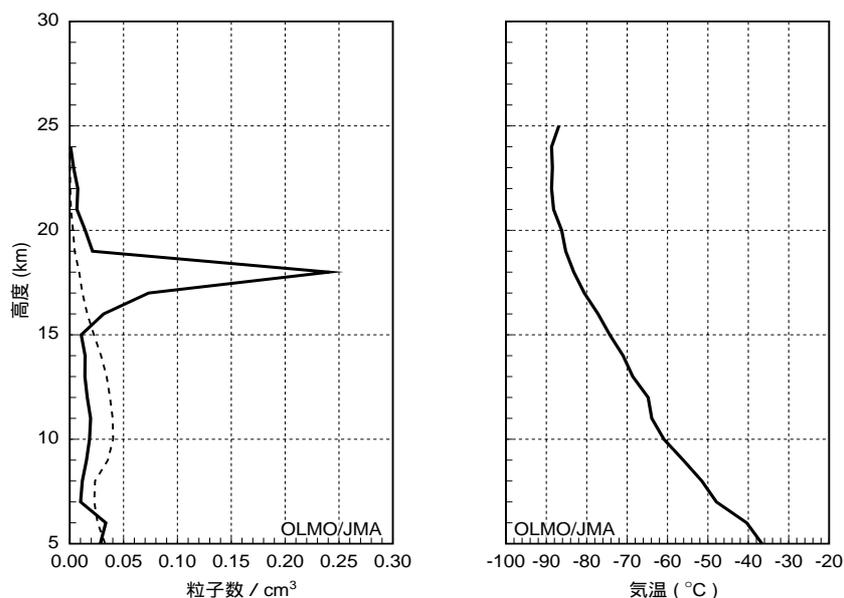


図 2 - 3 - 4 : 南極昭和基地におけるエアロゾルゾンデ観測結果

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 $0.8 \mu\text{m}$ 以上のエアロゾルの個数濃度で、実線は2002年8月4日の観測結果、破線は1997～2000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2002年8月4日の気温の分布。

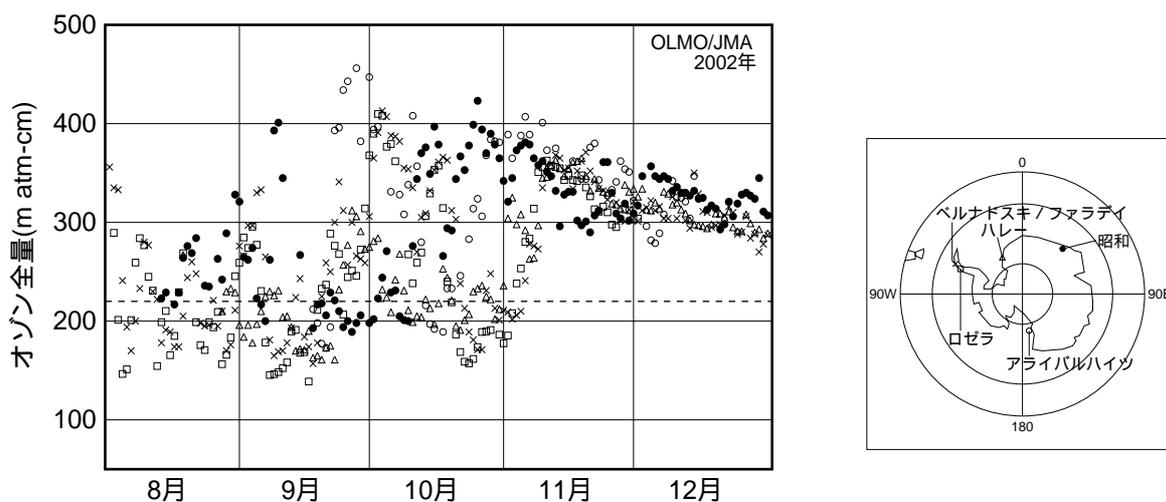


図 2 - 3 - 5 : 南極各基地におけるオゾン全量の変化

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2002年の8～12月のオゾン全量。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2-3-6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 220 m atm-cm を下回るデータが観測されているが、図には現れていない場合がある。

図には示さないが2002年のオゾンホールの状況を日別に見てみると、2002年8月2～12日の期間はTOMS機器の不具合による欠測のため不明だが、不具合修復後の8月13からは継続して 220 m atm-cm 以下の領

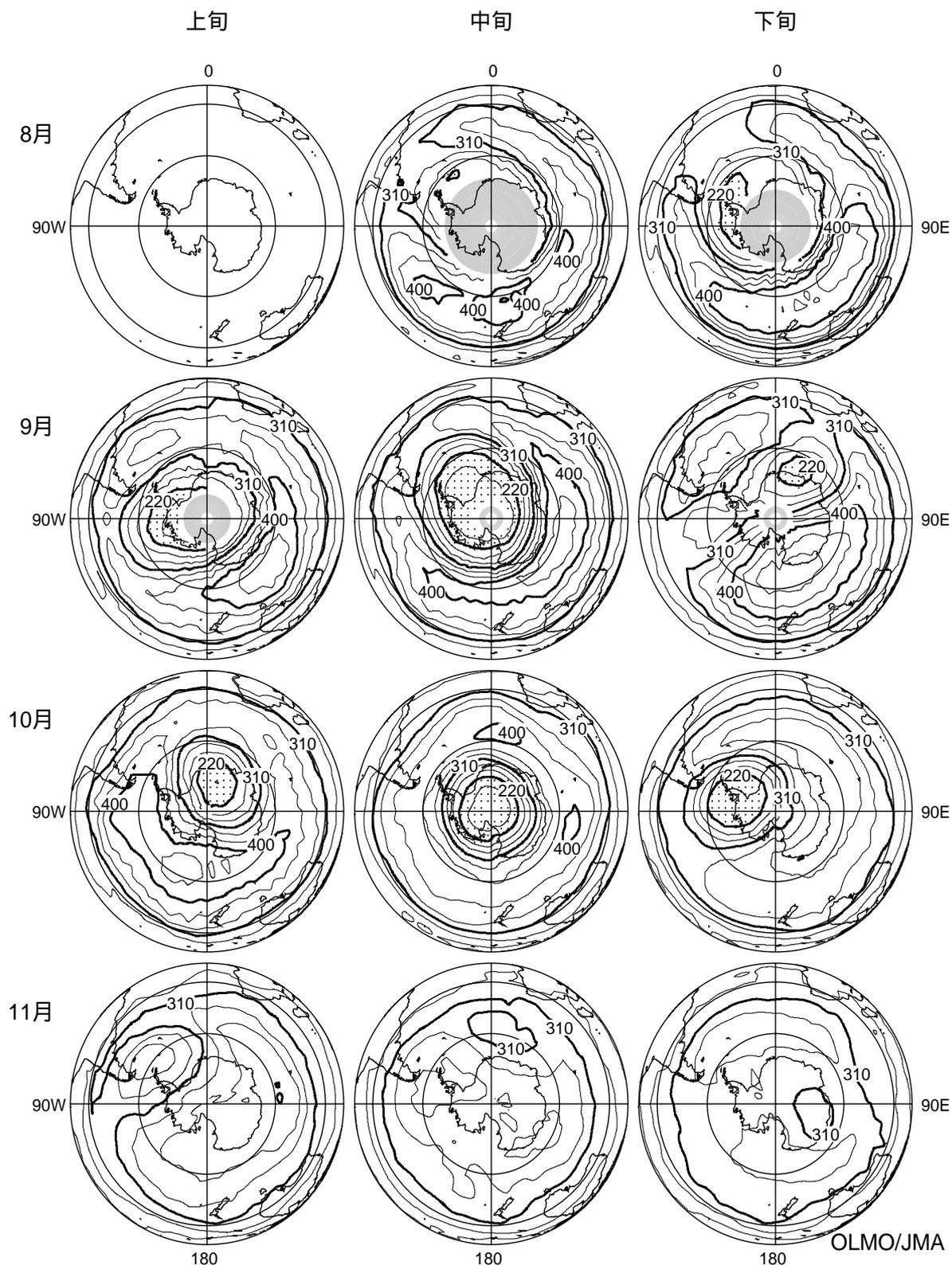


図2 - 3 - 6 : 2002年8月から11月の旬平均オゾン全量の南半球分布図

上段から8月、9月、10月、11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。なお、8月2～12日の間、機器の不具合により欠測となった。そのため、8月上旬の図は示さない。

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。

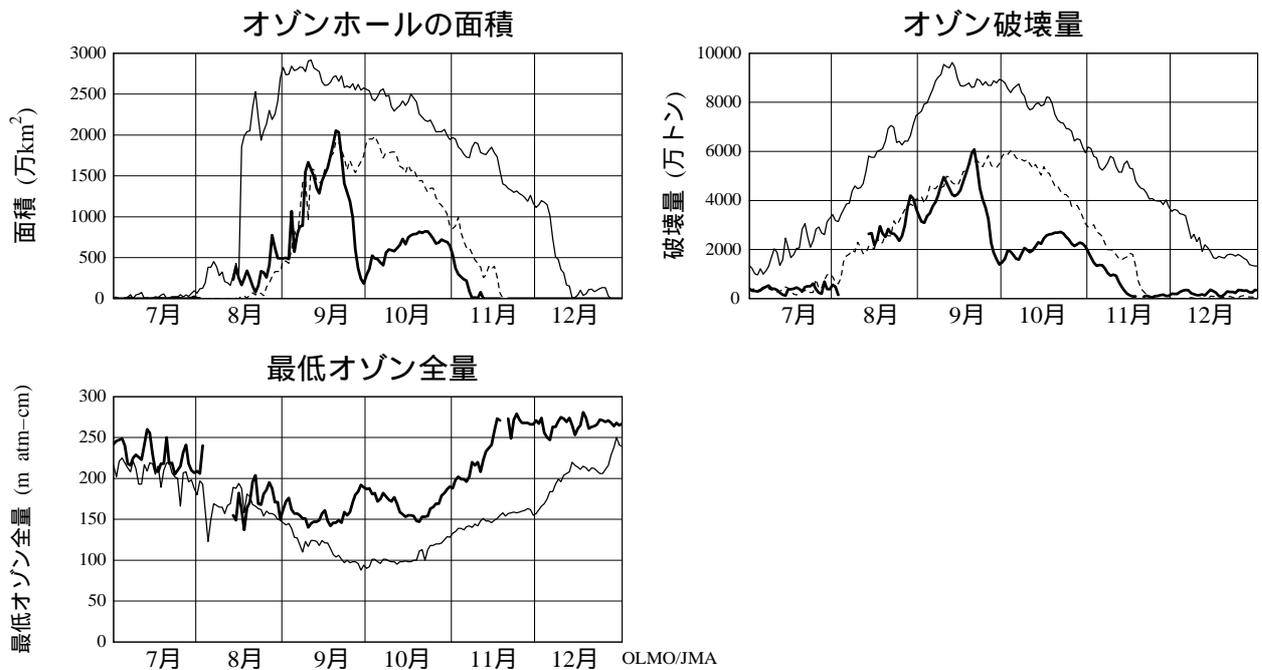


図2 - 3 - 7 : オゾンホールの規模の変化

太線は2002年の値、細線は1978～2001年の観測の中での最大値（面積、破壊量）及び最小値（最低オゾン全量）、破線は1990年～2001年までの最小値（面積、破壊量）。なお、8月2～12日の間、機器の不具合により欠測した。NASA提供のTOMS データを基に気象庁で作成。

域が現れた。9月中旬にはほぼ南極大陸全域を覆い、最も広くなった後に大きく変形し、二つに分かれ、ひとは消滅し、もう一方は10月下旬まで再発達したが11月中旬に消滅した（表紙）。また、オゾンホールの中心は、8月下旬から9月上旬にかけて南極半島上空にあり、9月中旬に南極点付近に移動し、分裂後は大西洋側（南米ホーン岬沖）の南極大陸縁辺と太平洋側（アフリカ喜望峰沖）の南極大陸縁辺のふたつとなったが、9月末に太平洋側が消滅し、大西洋側のものが発達して10月中旬には南極点上空に移動した。その後南極半島方面に移動し、11月中旬に消滅した。こうしたオゾンホールの中心の移動は、南極半島にあるベルナドスキ/ファラディ、ロゼラは8月からはオゾンホールの内側にあったこと、9月下旬のオゾンホール分裂時には昭和以外の地点がオゾンホールの外側に位置したこと、その後10月上旬から11月上旬にかけて大西洋側から南極半島方面に中心が移動し、消滅していくのに伴って、昭和、アライバルハイツ、ベルナドスキ/ファラディ、ロゼラ上空の順番でオゾン全量の増加が観測されるなど、図2 - 3 - 5で示した地上観測点でのオゾン全量の変化に対応している。

図2 - 3 - 7は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。これによると、2002年のオゾンホールは1990年以降最も小規模な状態で発達し、9月19日に2002年の最大面積（2,054万km²、1991年以降最小）を記録した。その後、大きく変形・分かれたことに伴って、急速に規模を縮小し、片方のオゾンホールが消滅した9月29日に面積は183万km²まで減少した。しかし、もう一方の再発達に伴って面積は10月21日まで再び増加した後次第に縮小し、11月11日に消滅した。これは、1989年以降最も早い消滅だった。オゾン破壊量も、面積同様1990年以降に比べて小さい状態で推移し、2002年のオゾン破壊量の最大値は6,084万トン（9月20日、1991年以降最小。過去最大であった2000年の約6割）であった。最低オゾン全量は、例年9月下旬から10月上旬にかけて観測されるが、2002年は8月17日（137m atm-cm）であった。

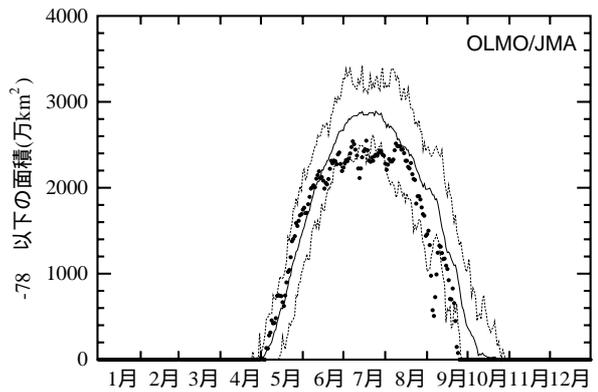
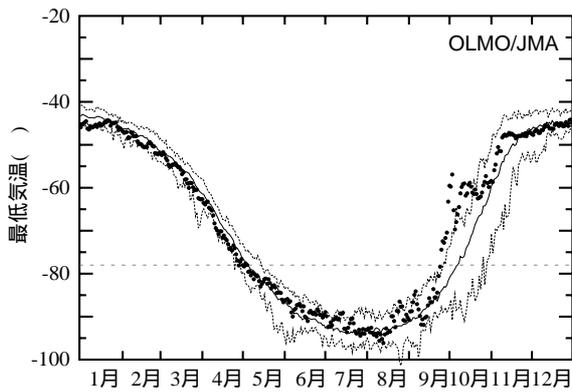


図2 - 3 - 8 : 南極域上空の下部成層圏の最低気温、及び気温が - 78 以下の領域の面積の推移
南緯60度以南の30hPa(高度約24km)面における日別の最低気温の推移(左図)及び極域成層圏雲の出現する目安となる - 78 以下の領域の面積の推移(右図)。印は2002年の値、実線は1988～2001年の累年平均値、破線は同期間の最低気温(面積)の最高値(最大値)及び最低値(最小値)。

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(1993、気象庁)。図2 - 3 - 8に気象庁で作成した2002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。2002年の南極域の最低気温は7月下旬から8月中旬、9月中旬に累年平均(1988～2001年の平均)並かやや低かったほかは、5月以降11月中旬まで累年平均より高めに推移し、特に9月下旬から10月中旬は大規模な昇温が起こったために1988年以降で最も高い値を記録した。- 78 以下の領域の面積(図2 - 3 - 8右)で見ると、5月から6月前半及び8月中旬～8月下旬にかけて累年平均並であったほかは小さく、時期によっては1988年以降の最も小さい値を記録し、9月下旬には - 78 以下の領域はなくなった。特にオゾンホール発達前の6～8月における - 78 以下の領域の面積は1980年以降で2番目に小さかった。

一般にこの時期の成層圏気温の昇温の原因としては対流圏からのプラネタリー波による西向き運動量の流入によって、極渦が減速することなどが考えられている。口絵2に全球解析データを基にした2002年の南極域の成層圏気温を、図2 - 3 - 9に対流圏から成層圏への西向き運動量の流入を示す指標(EP-フラックス(Plumb, 1985))の変動を示す。これによれば、2002年は6月から西向き運動量の周期的な流入が頻繁に見られ、成層圏気温が高めに推移した後、9月下旬にそれまでの数倍に達する大きな西向き運動量の流入により大規模な昇温(突然昇温)が起こり、それを境に気温の鉛直構造が大きく変わったことがわかる。これは、極渦が弱まり、オゾンホールが変形し、2つに分かれた時期と一致している。また、2002年の南極域におけるこのような昇温は、過去20年間で見られなかったような大規模なものであり、例年と大きく異なった気象状況にあったことを示唆している。

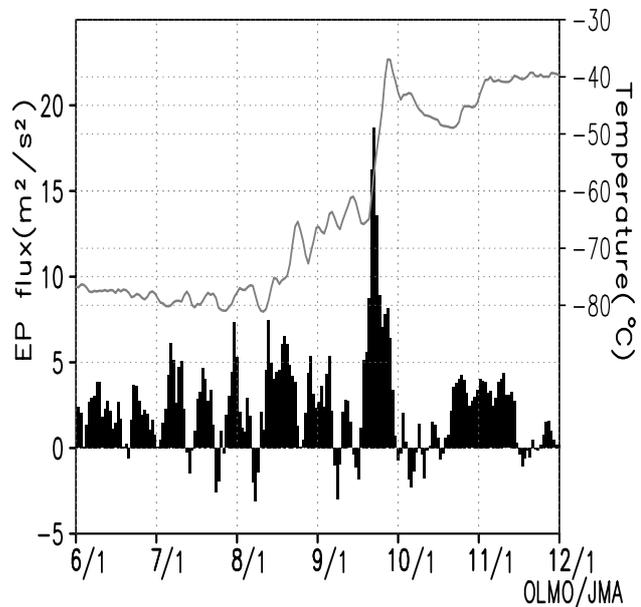


図2 - 3 - 9 : 南極域上空の気温の推移と対流圏からの西向き運動量の流入の関係

対流圏から運ばれる西向き運動量の指標として、100hPa面での南緯30度以南で平均したEP(Eliassen-Palm)フラックスの鉛直成分(単位は m^2/s^2)の時系列を示す。下層から上層に流入する運動量を正とする。また、実線は30hPaにおける南緯60度以南の平均気温。

2 - 3 - 6 2002年の南極オゾンホールの特徴

以上の観測結果から、2002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。

2002年のオゾンホールは、最大時の面積が1991年以降最小で、またその形状が変形・分裂し、1989年以降最も早く消滅した。

このような特徴をもたらした原因として、2002年の南極域上空の成層圏では、対流圏からの西向き運動量の大きな流入によって極渦が弱まり、気温が累年平均より高く極域成層圏雲の出現の目安となる -78 以下の領域が小さかったこと、このため、極域成層圏雲の中で生ずる活性塩素の発生が抑えられ、オゾン破壊が小さかったことが考えられる。さらに、極渦が2つに分かれるなど気象力学的に不安定であったためオゾンホールの外側にあるオゾン濃度の高い空気がオゾンホールの内側の空気と混ざりやすくなったこともあげられる。このように、2002年のオゾンホールが小規模であったことには、2002年に特徴的な気象状況が強く関係しているといえる。