

3 オゾン層の長期変化傾向

オゾン層の長期変化傾向に関し、全球、日本上空及び南極域上空のオゾン層について解析した結果を述べる。ここではオゾンに関する量(オゾン全量、オゾン分圧、層別オゾン量)の長期変化傾向を量的に表現するために、季節変動、太陽活動、準2年周期振動(QBO; Quasi-Biennial Oscillation)といった既知の自然要因と相関の高い変動成分を除去したときの2004年までの変化率(トレンド:10年あたりの変化を百分率もしくは変化量で表す)を用いる。

3 - 1 長期変化傾向(トレンド)解析手法

ここでは、本報告で採用した長期変化傾向を解析する手法について説明する。図3-1-1に、札幌、つくば、鹿児島、那覇における観測開始から2004年12月までのオゾン全量の月平均値の推移を示す。月平均値の変動には年平均値の20~30%の幅の季節変動が見られ、その大きさは年によって異なっている。現在問題とされているトレンドは、10年間で数%程度の大きさであり、トレンドの有無については以下のような手順で判定を行う。

図3-1-2に、上記の月平均値から季節変動成分を除いたオゾン全量の経年変化を示す。オゾン量の経年変化には季節変動以外に、2~3年や10年程度のほぼ周期的な変動成分が含まれている。代表的なものとして、QBOや太陽活動が知られている。信頼度の高いオゾントレンドを求めるため、通常、これらの変動と相関の高い成分をオゾンの時系列データから除去する(WMO, 1992)。

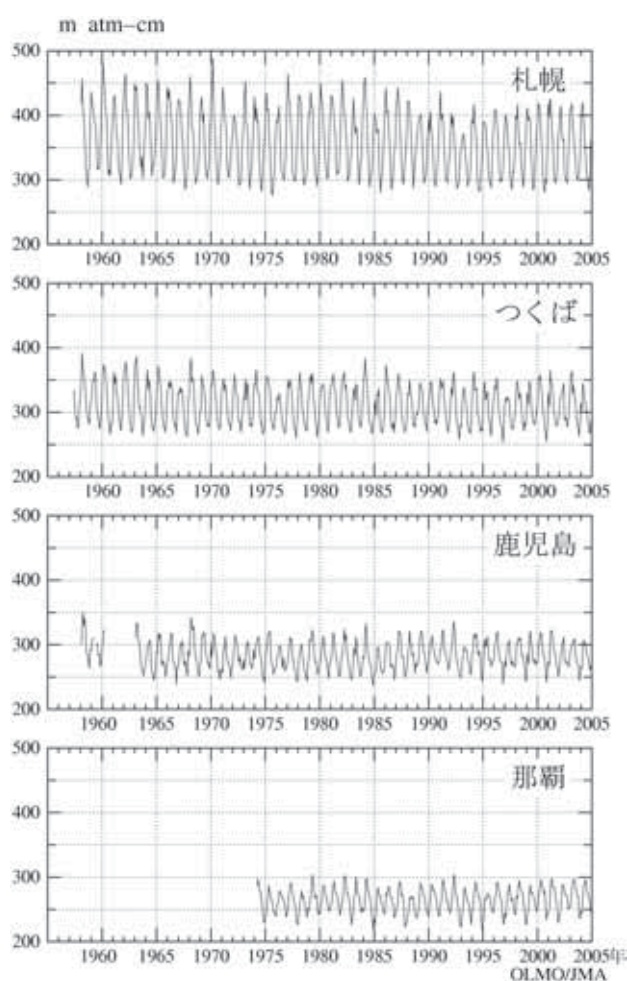


図3-1-1: 日本上空のオゾン全量の月平均値
札幌、つくば、鹿児島、那覇についての観測開始から2004年12月までのオゾン全量の月平均値。

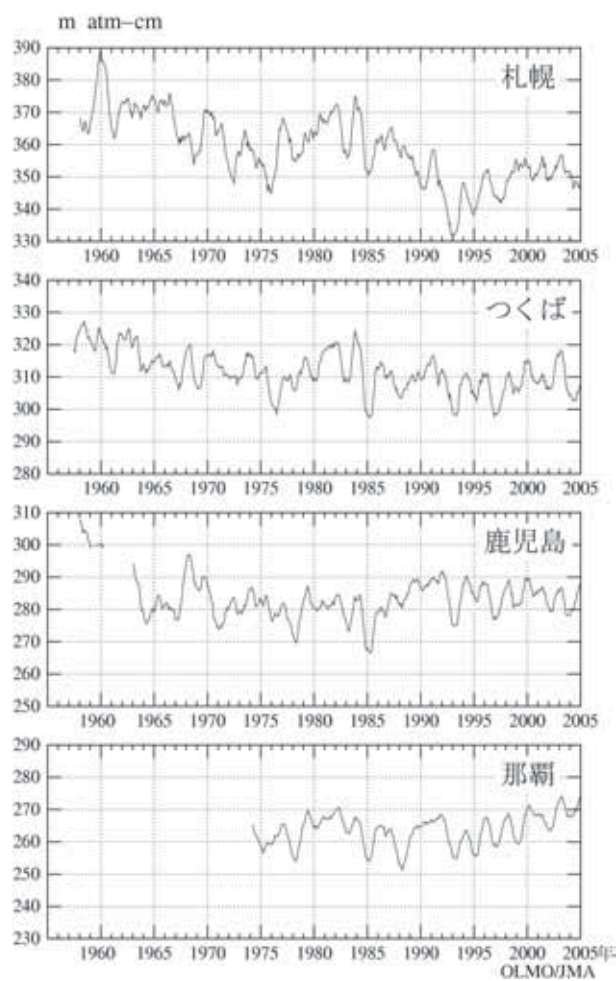


図3-1-2: 季節変動除去後のオゾン全量の推移
図3-1-1のデータから季節変動を除去した後、13ヶ月移動平均した。

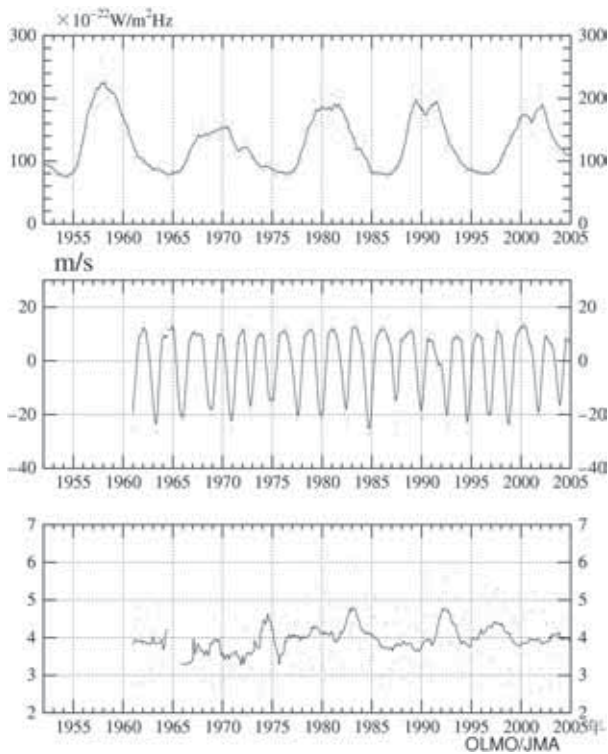


図3 - 1 - 3 :トレンド解析に使用する既知の自然要因

上図は国立天文台野辺山観測所の太陽電波フラックス(3,750MHz、単位は $10^{-22}W/m^2 \cdot Hz$)で、実線は13ヶ月移動平均値。中図はシンガポール上空の50hPa面における風の東西成分(m/s)で、実線は7ヶ月移動平均値。下図はつくばにおける直達日射観測から評価した大気の混濁係数で、実線は13ヶ月移動平均値。

図3 - 1 - 3に長期変化傾向の解析(トレンド解析)において除去すべき要因の時系列を示す。この除去する要因としては、約11年周期の太陽活動(上図)、約2年周期のQBO(中図)があり、また、反転観測では、大きな火山噴火等で生じる大気の混濁の影響が測定誤差として現れるため、直達日射量から算出した大気混濁係数(下図)も使用した。なお、本書では考慮しないが、オゾン変動に影響をもたらすものとして上記の自然変動以外に、エルニーニョ南方振動(ENSO; El Nino and Southern Oscillation)や北大西洋振動(NAO; North Atlantic Oscillation)等の力学的要因等があり、これらの影響を考慮したトレンド解析の例には、Appenzeller 他(2000)、Bronnimann 他(2000)がある。

ここでは、例としてつくばにおけるオゾン全量のトレンド解析を示す(図3 - 1 - 4)。(1)は解析対象のオゾン全量の月平均値、(2)はオゾン全量の月平均値の49ヶ月移動平均値と太陽活動の目安となる太陽電波フラックス(3,750MHz)値の13ヶ月移動平均値、(3)はオゾン全量から季節変動と太陽活動に依存する変動成分を取り除いた値とQBOの指標となるシンガポール上空50hPa面の風の東西方向の風速の7ヶ月移動平均値、(4)はこれらの変動成分を除いたオゾン全量とそれに対するトレンドである。

実際の解析の手順は以下の通りである。

- 1)オゾン全量の季節変動除去値の時系列を目的変数とし、太陽電波フラックスの13ヶ月移動平均値とQBOの7ヶ月移動平均値(いずれも地点毎にオゾン全量との相関が最も高くなるように時間ラグを設定)及び直線トレンド成分を説明変数とした重回帰式を求める。

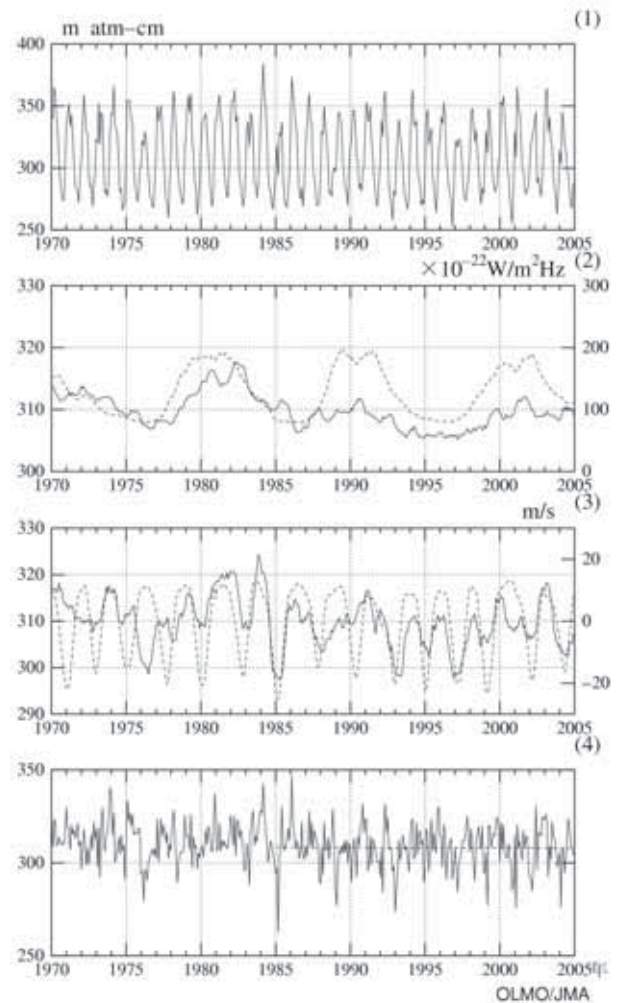


図3 - 1 - 4 :つくばにおけるオゾン全量のトレンド解析例

(1)月平均値、(2)月平均偏差の49ヶ月移動平均値(太線)と太陽電波フラックスの13ヶ月移動平均値(破線)、(3)月平均値から季節と太陽活動の影響を取り除いた時系列の13ヶ月移動平均値(太線)とQBOの7ヶ月移動平均値(破線：時間ラグを設定)、(4)季節変動、太陽活動及びQBOの影響を除去したオゾン全量時系列(太線)と最近20年間の直線トレンド(破線)。

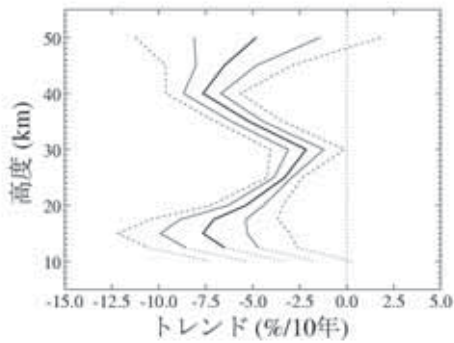
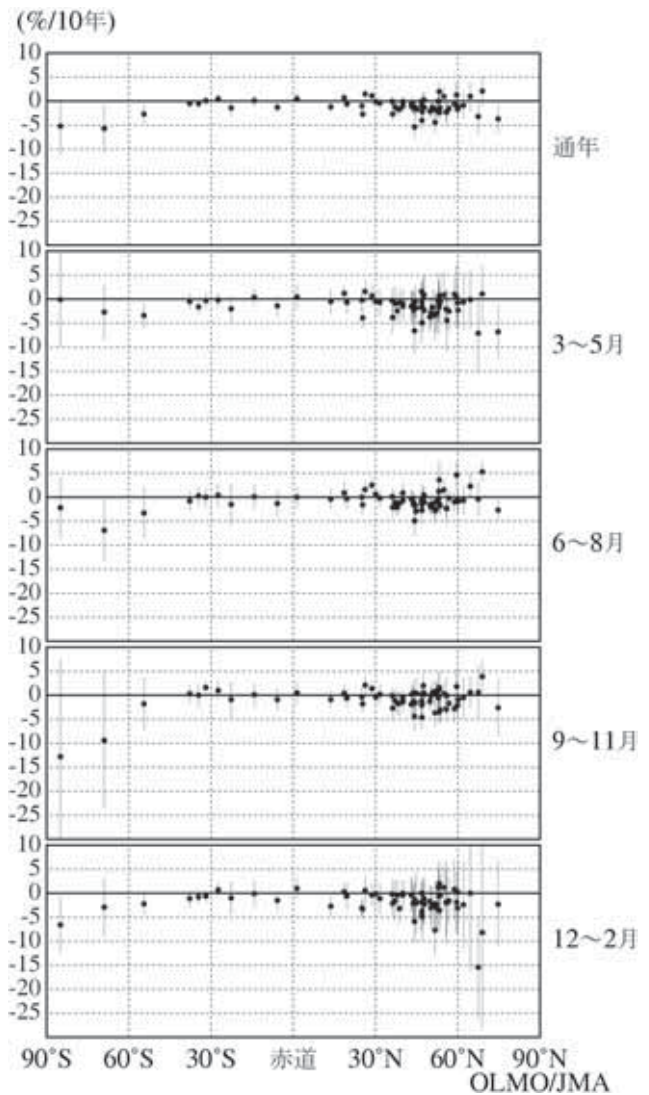


図3 - 2 - 1 : オゾンのトレンドの高度分布
1980 ~ 1996年のSAGE 1/11、SBUV、オゾンゾンデ、反転観測データを基に作成した北半球中緯度の高度別オゾンのトレンド(%/10年)。実線がトレンドと68%の信頼限界、破線は95%の信頼限界(WMO, 1998)。

図3 - 2 - 2 : 地上観測データによるオゾン全量トレンドの緯度分布

最近20年間(1985 ~ 2004年)の世界の観測地点(66地点)におけるオゾン全量のトレンド(%/10年)。横軸が緯度、縦軸がトレンドである。それぞれの点が各観測地点におけるトレンドを示し、縦棒は95%信頼限界の範囲を示す。上から順に、通年、3 ~ 5月、6 ~ 8月、9 ~ 11月、12 ~ 2月におけるトレンドである。



- 2)この回帰式を用いて、太陽電波フラックスとQBOの変動と対応するオゾン全量の成分を算定し、目的変数からこれらの成分を除去した時系列を作る。
- 3)この時系列に直線回帰を適用してトレンド(通年及び季節・月別)を決定する。
- 4)オゾン全量変化のトレンド直線からの偏差(残差)に自己回帰を考慮して95%信頼限界を決め、これを超えた場合を有意とする。

3 - 2 全球的なオゾン層の長期変化

成層圏のオゾン量には、赤道付近を除いて減少傾向が現れている。図3 - 2 - 1に示す北半球中緯度でのオゾントレンドの高度分布によれば、オゾン減少の極大は高度40km付近と高度15km付近に現れている(WMO, 1998)。この2つの高度のオゾン減少は、ともにクロロフルオロカーボン類などから遊離した塩素によるものであるが、その破壊メカニズムは異なっている。高度40km付近の減少は気体分子だけが関係して働く触媒反応のサイクルによるものであるのに対し、高度15km付近の減少はエアロゾル粒子表面での化学反応によって働く触媒反応サイクルによるものである(2章の解説参照)。

3 - 2 - 1 地上観測データによるトレンド

世界の地上観測地点におけるオゾン全量データについて、2004年までの過去20年のトレンドを求めた。この解析に用いた観測地点の選択にあたっては、最近20年間の観測資料がほぼ継続して得られていること、及び毎月の月平均のデータとTOMSによる観測データとの全期間を通した比較において、データの精度に特に問題がないと判断されることを基準とした。また、観測機器の変更等により観測データに不自然な段差が見られる場合には、その観測データに補正を施した後、解析を行った。3 - 1節で示したトレンド解析の手法を

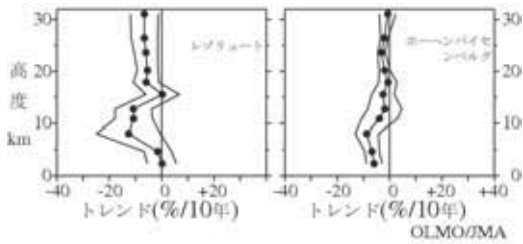


図3 - 2 - 3 : 北半球の2 地点におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

印はオゾンゾンデ観測による20年間(1984～2003年)の月平均オゾン分圧を基に評価した高度別トレンド(%/10年)。細い折線は自己回帰を考慮した95%信頼限界。左がレゾリュート(カナダ、北緯74.72度、西経94.98度)、右がホーヘンパイセンベルク(ドイツ、北緯47.80度、東経11.02度)。

用いて、地点毎に季節変動、太陽活動、QBOに依存する変動成分を除去した時系列に直線回帰を適用してトレンドを求めた。

図3 - 2 - 2は、地上の観測点について最近20年間(1985～2004年)の通年及び季節毎のオゾン全量トレンドの緯度分布を示している。これを見ると、通年及び各季節とも低緯度を除いて多くの地点で減少傾向を示していることがわかる。特に北半球の北緯30度以北では、通年及び3～5月に有意な減少傾向を示している地点が多い。南半球高緯度(南緯60度以南)の9～11月は南極オゾンホール出現に伴い、10%/10年を超える減少を示している。ただし、統計期間及び年々の変動の大きさにより統計的に有意にはなっていない。

これらの解析結果から、最近20年間のオゾン全量のトレンドは低緯度を除いて明らかな減少を示しているといえる。

図3 - 2 - 3に、北半球で継続してオゾンゾンデ観測を行っている地点の中から選んだ2地点について、3 - 1節で述べた手法に従って求めたオゾン分圧トレンドの高度分布を示す。なお、このトレンドは通年について計算している。これによれば、カナダ北部のレゾリュート及びドイツのホーヘンパイセンベルクとも下部成層圏のオゾンの減少傾向が見られており、特にレゾリュートでは高度8～13km付近と高度18kmより上空で有意な減少傾向が見られる。

3 - 2 - 2 衛星による観測

口絵1は、TOMSデータを基に、緯度毎に月平均したオゾン全量の参照値(1979～1992年の平均)に対する比偏差の経年変化及びシンガポール上空の月平均東西風の経年変化を示したものである。これによると、赤道上空のオゾン全量は約2年の周期で増減を繰り返しており、中緯度のオゾン全量の変動と時間的なずれが見られる。これは、QBOに伴う成層圏におけるオゾンの南北輸送の変動によるものである(WMO, 1999)。

1章にも述べているように、TOMSは2002年頃から観測装置に起因する誤差(主に光学系の特性変化)が大きくなったため、NASA(米国航空宇宙局)でデータの見直しが行われ、最近のデータはトレンド解析には

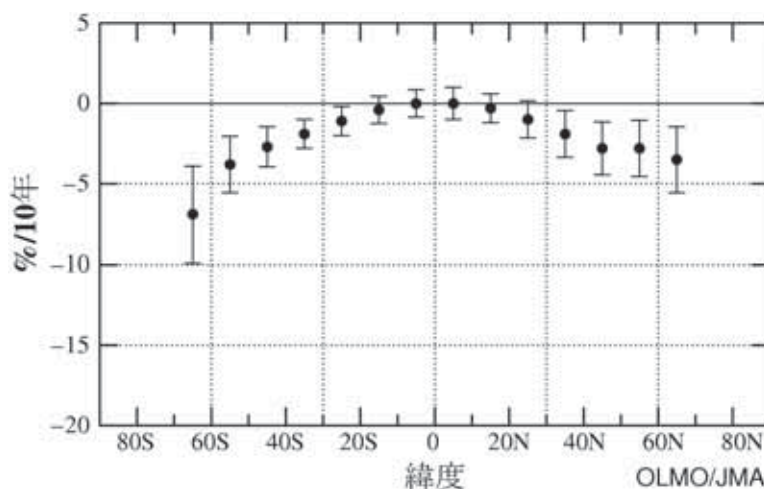


図3 - 2 - 4 : MOD データによる緯度帯別オゾン全量トレンド

緯度10度毎の平均オゾン全量の時系列(1979～2000年)から、季節変動、太陽活動、QBOの影響を除去して評価したトレンド(%/10年)。縦線は自己回帰を考慮した95%信頼限界である。NASA提供のMODデータから評価。

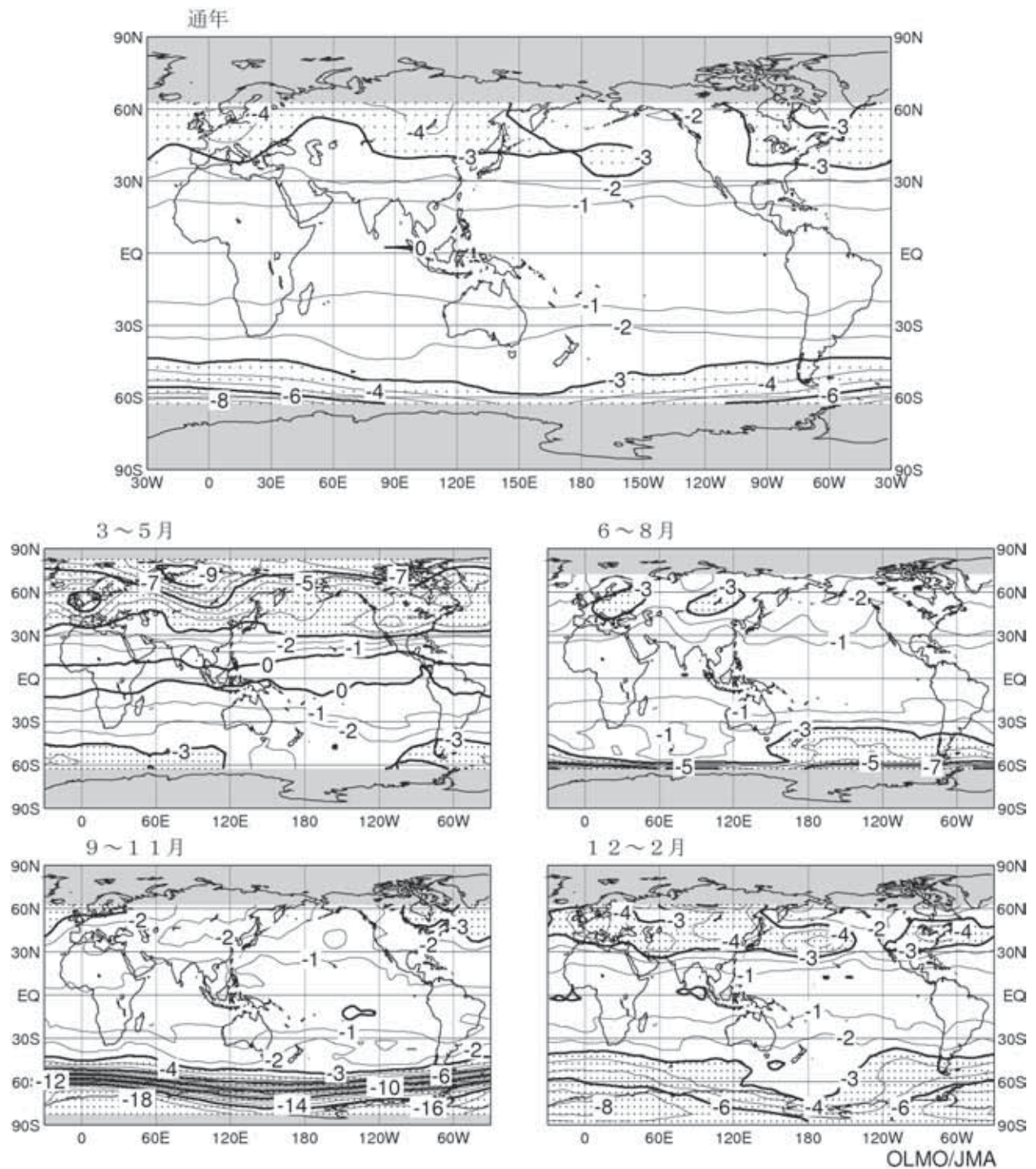


図3 - 2 - 5 : TOMS によるオゾン全量トレンドの全球分布

緯経度格子点 (5度メッシュ) 毎の月平均オゾン全量時系列 (1979 ~ 2000年) に、季節変動、太陽活動、QBOの影響を除去して評価したトレンド (%/10年) の全球分布図。上段は通年、下段はそれぞれ左上が3 ~ 5月、右上が6 ~ 8月、左下が9 ~ 11月、右下が12 ~ 2月についてのトレンド。等値線間隔は1%/10年。陰影部は極域でデータが取得できない領域。点域は、減少率が-3%/10年を超える領域。NASA 提供の TOMS データから評価。

使用できないと発表されている。このため2000年までのデータについては、NASAの提供するMODデータを用いたところ、TOMSデータよりも地上観測値と整合することがわかった(1 - 2節参照)。そこで、ここで述べる衛星データを用いた緯度帯別のトレンドの算出については、MODデータから評価した。しかしMODデータセットの分布データは緯度10度×経度30度メッシュの緯経度格子点データの形式で公開されているため、地域別のオゾン分布を評価するためには利用しにくい。そこでトレンドの全球分布については、MODデータによる解析結果と若干異なる可能性があることに留意しつつ、2000年までのTOMSデータを用いた結果を示す。

なお、1995年の通年と1993、1994、1996年の一部についてはTOMSによる観測が行われていないので、解析には用いていない。

図3-2-4は、MODデータを用いた緯度10度毎のオゾン全量についてのトレンド解析の結果である。低緯度では統計的に有意な変化傾向は現れていないが、北緯30度以北及び南緯20度以南で統計的に有意な減少傾向を示している。減少率は地上観測によるトレンドと同様に、高緯度ほど大きくなっている。北緯60度から南緯60度の平均でも、 $-1.3 \pm 0.6\%/10$ 年の有意な減少傾向になっている。

図3-2-5に、2000年までのTOMSデータを解析したオゾン全量トレンドの全球分布を示す。ここでは緯度帯毎に、経度方向及び季節によるトレンドの差異を論じることとする。通年の場合、北緯60度付近ではシベリア北部及びヨーロッパ北部上空でオゾン減少が大きく、北アメリカ西部は減少率が小さい。南緯60度付近ではオーストラリア南方から南太平洋上空でオゾン減少率が比較的小さく、南アメリカ南方からアフリ

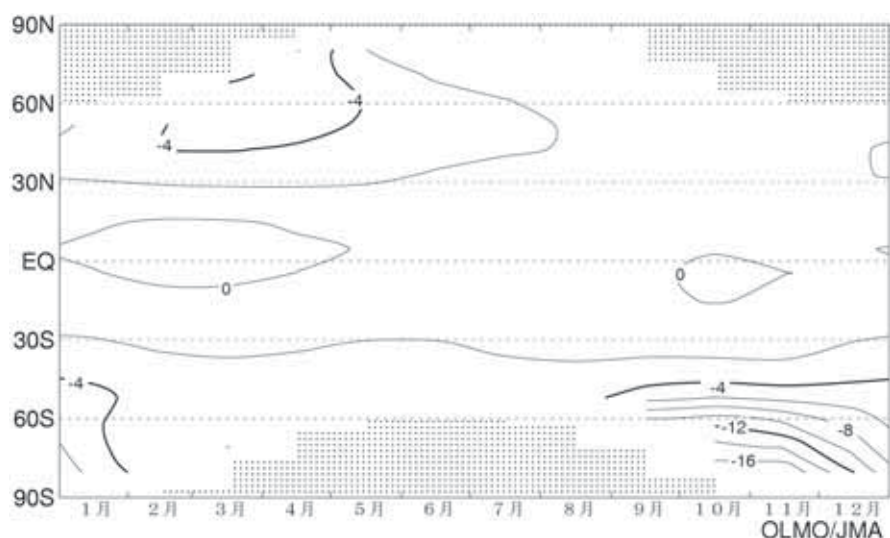


図3-2-6：MODデータによるオゾン全量トレンドの緯度別季節変動

月平均オゾン全量（1979～2000年）について、緯度10度毎の緯度別平均値を求め、季節変動、太陽活動、QBOに依存する変動成分を除去した後、月別に直線回帰を適用して評価した緯度毎のオゾントレンド（%/10年）の季節変動。等値線間隔は2%/10年。NASA提供のMODデータから評価。点域はデータが取得できない領域。なお、衛星による観測は太陽光を用いるため極夜の部分では観測できない。

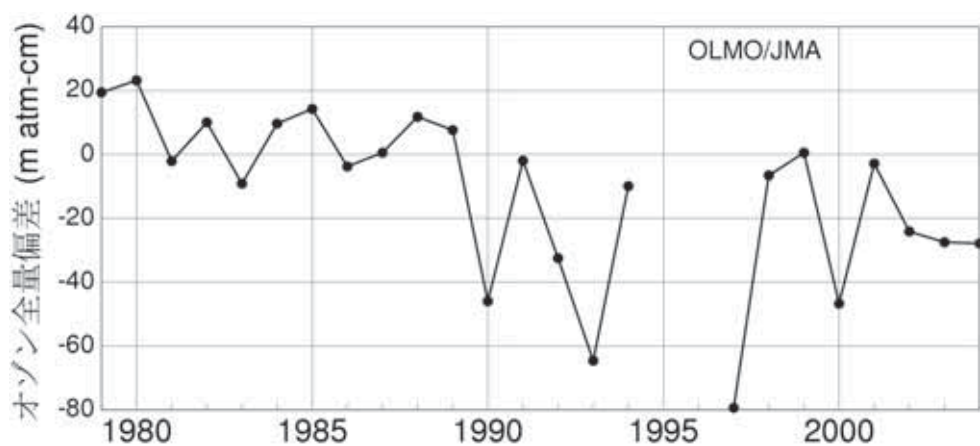


図3-2-7：北半球高緯度の3、4月のオゾン全量偏差の経年変化

北半球高緯度（北緯60度以北）の3、4月の平均オゾン全量の参照値（1979～1992年の平均値）からの偏差。NASA提供のTOMSデータを基に気象庁で作成。なお1995、1996年はTOMSデータがない。

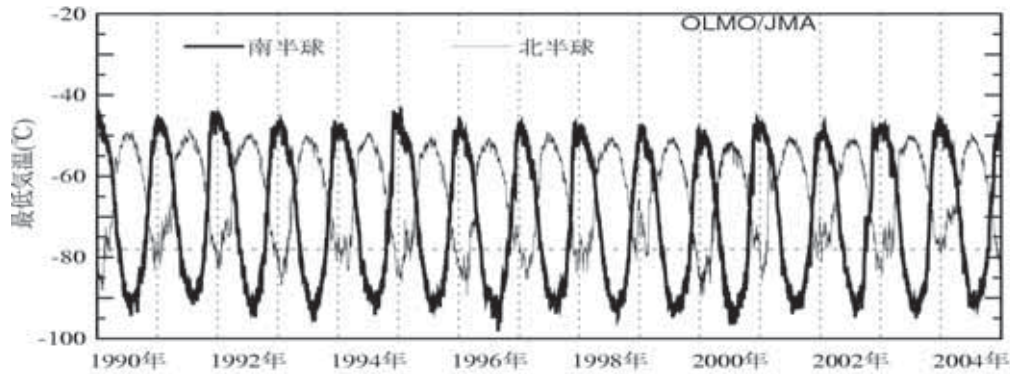


図3 - 2 - 8 : 高緯度域の最低気温の経年変化

北緯60度以北、南緯60度以南の50hPa面の日別最低気温の変化。図中の破線は極域成層圏雲(PSCs) 発生の目安となる -78 の気温を示す。気象庁全球解析データを基に作成。

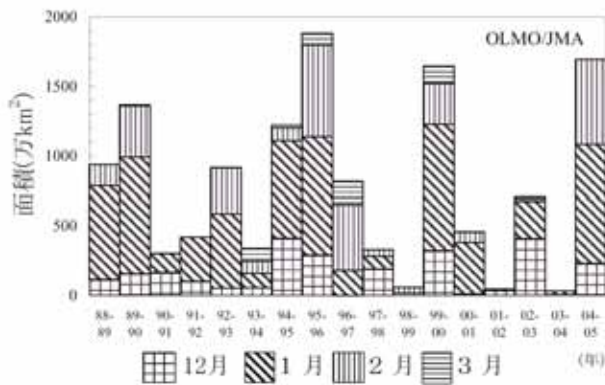


図3 - 2 - 9 : 冬季の北半球高緯度における低温域の面積の月平均値の推移

北緯60度以北の50hPa面における、極域成層圏雲出現の目安となる-78 以下の領域の面積の12~3月の月平均値の推移。2005年は2月までの値を掲載している。気象庁全球解析データを基に作成。

カ南方上空にかけて減少率が高い。季節別に見ると、北半球では春季(3~5月)にシベリア北部、カナダ北東部上空を中心に大きなオゾン減少を示しており、冬季(12~2月)には中緯度のヨーロッパ、東アジア、北太平洋、北アメリカ東部上空でも減少が大きくなっている。南半球高緯度では春季(3~5月)を除いてオゾン減少が顕著に見られ、南半球中緯度では春季(9~11月)、夏季(12~2月)に大西洋を中心に減少が大きいことがわかる。

図3 - 2 - 6にはMODデータによるオゾン全量トレンドの緯度別季節変動を示す。それによれば、北半球高緯度の3~4月及び南半球高緯度の9~12月にオゾンの減少傾向が大きい。塩素によるオゾン破壊は、低温の気象状況で促進されるため、より低温の高緯度ほど減少が大きくなる。また、冬季から春季にかけてオゾン層の破壊が進むため、春季に最も減少傾向が顕著となる。

北半球高緯度の状況を見るために、TOMSデータから評価した年毎の3、4月の平均オゾン全量の偏差を、北緯60度以北について図3 - 2 - 7に示す。北半球高緯度でも、1990年以降、春季に顕著なオゾン減少が現れており、特に1997年は大規模であった。2004年春季にも、20m atm-cmを超えるオゾン減少が見られた。1990年以降、データのない1995、1996年を除き、20m atm-cm以上の負偏差が13年のうち8回現れており、北半球高緯度でのオゾン減少が1990年以前に比べ明瞭になっている。なお、1996年にはTOMSデータはないが、Newman他(1997)のSBUV/2のデータを用いた解析によると、3月に平年より24%低いオゾン全量が観測されていた。

このような北半球高緯度での春季のオゾン減少は、南極オゾンホールと同様の過程により生じていると考えられる(WMO,1998)。図3 - 2 - 8に、気象庁全球解析データによる高緯度域(北緯60度以北、南緯60度以南)の50hPa(高度約20km)面での最低気温の経年変化を示す。南半球の冬季は長期間、最低気温が極域成層圏雲の発生の目安となる-78を下回るが、北半球では下回るのは短期間である。このような気象条件のため、北半球高緯度では通常南極域のような大規模なオゾン減少は起こらないものの、気温がわずかに低下することで極域成層圏雲の発生する期間・領域が大幅に拡大し、オゾン破壊が一気に加速することがある。

気温の変動に敏感なことから、北半球高緯度のオゾン破壊の規模は年ごとの変動が大きい。図3 - 2 - 9は、北緯60度以北の50hPa面における、極域成層圏雲出現の目安となる-78 以下の領域の月平均面積の推移を示している。春季にオゾン減少が顕著だった1990、1993、1997、2000年（図3 - 2 - 7参照。1995、1996年はデータなし）に共通する特徴は、2、3月の低温域の面積がその月としては広がったことで、オゾン全量偏差と逆相関の関係にある。太陽光が戻ってくる春季にかけて極域成層圏雲の生成に十分な低温域が維持されていることで、南極オゾンホールと同様の化学的な過程によりオゾン破壊が促進される。

極域のオゾン変動には、輸送の変動も影響している。冬季、極渦が平年よりも安定して存在すると、低緯度域から極域へのオゾン輸送が少なくなり、極域のオゾンは減少する。このため、極渦が安定している年は、オゾン輸送量の減少と化学的なオゾン破壊現象があいまって、極域のオゾンが減少するものと考えられる。

2004年12月から2005年2月の期間の低温域の面積の合計は、オゾン減少が顕著だった1999年12月から2000年3月の期間を上回っていたが、3月中旬の成層圏突然昇温によって極渦が変形し消滅したため、大規模なオゾン破壊が発生するには至らなかった。

3 - 3 日本上空のオゾン層の長期変化

図3 - 3 - 1に札幌、つくば、鹿児島、那覇のオゾン全量の年平均値の推移を示す。この図から日本上空でも高緯度ほどオゾンの減少が大きくなる傾向が見られる。図中の直線は、観測開始から2004年までの年平均値に対する長期的な変化傾向を示しており、3 - 1節で述べた既知の要因に依存する変動成分を取り除いて求めるトレンドとは異なる点に注意が必要である。

日本上空のオゾン全量の経年変化が季節によってどう違うかについて述べる。図3 - 3 - 2はオゾン全量の季節平均値の経年変化を示す。これによれば、春季、冬季に札幌、つくば、鹿児島での減少傾向が顕著に見られ、札幌では、1990年以降、夏季、秋季でもオゾン全量の減少傾向が見られることが注目される。なお、鹿児島のオゾン全量については、1986年付近でデータに原因不明の不連続が生じているため、1986年以前のデータについては上方修正している（気象庁，1992）。

図3 - 3 - 3は、日本国内4地点のオゾン全量の通年及び各季節の最近30年及び20年のトレンドをまとめたもので、数値を表3 - 3 - 1に示す。図の印はトレンドが統計的に有意であることを示す。最近30年間で有意な減少トレンドを示しているのは、札幌の通年（ $-1.5 \pm 0.8\%/10年$ ）、春季（ $-2.3 \pm 1.7\%/10年$ ）及び冬季（ $-2.4 \pm 2.0\%/10年$ ）、鹿児島の通年（ $-0.8 \pm 0.6\%/10年$ ）及び冬季（ $-1.7 \pm 1.2\%/10年$ ）である。最近20年間では、札幌の秋季（ $-2.0 \pm 1.9\%/10年$ ）で有意な減少トレンドを示している。一方、那覇では最近30年間の通年と夏季、最近20年間の通年と冬季を除くすべての季節で増加トレンドを示している。

図3 - 3 - 4にオゾン全量トレンドの緯度別季節変動を示した。これによると、札幌の4、5月と10、11月に顕著な減少トレンドがみられる。また、2、4月につくばと鹿児島でも減少トレンドがみられる。一方、3月

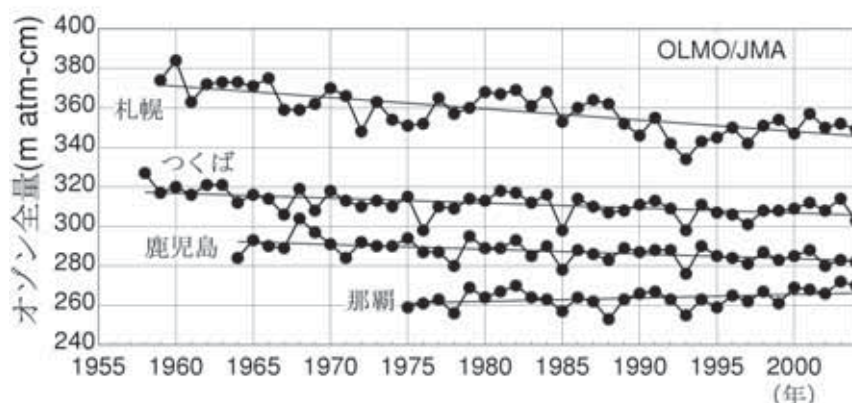


図3 - 3 - 1 : 日本上空のオゾン全量の年平均値の推移

印は札幌、つくば、鹿児島、那覇におけるオゾン全量の観測開始から2004年までの年平均値。直線は全期間の長期的な傾向。

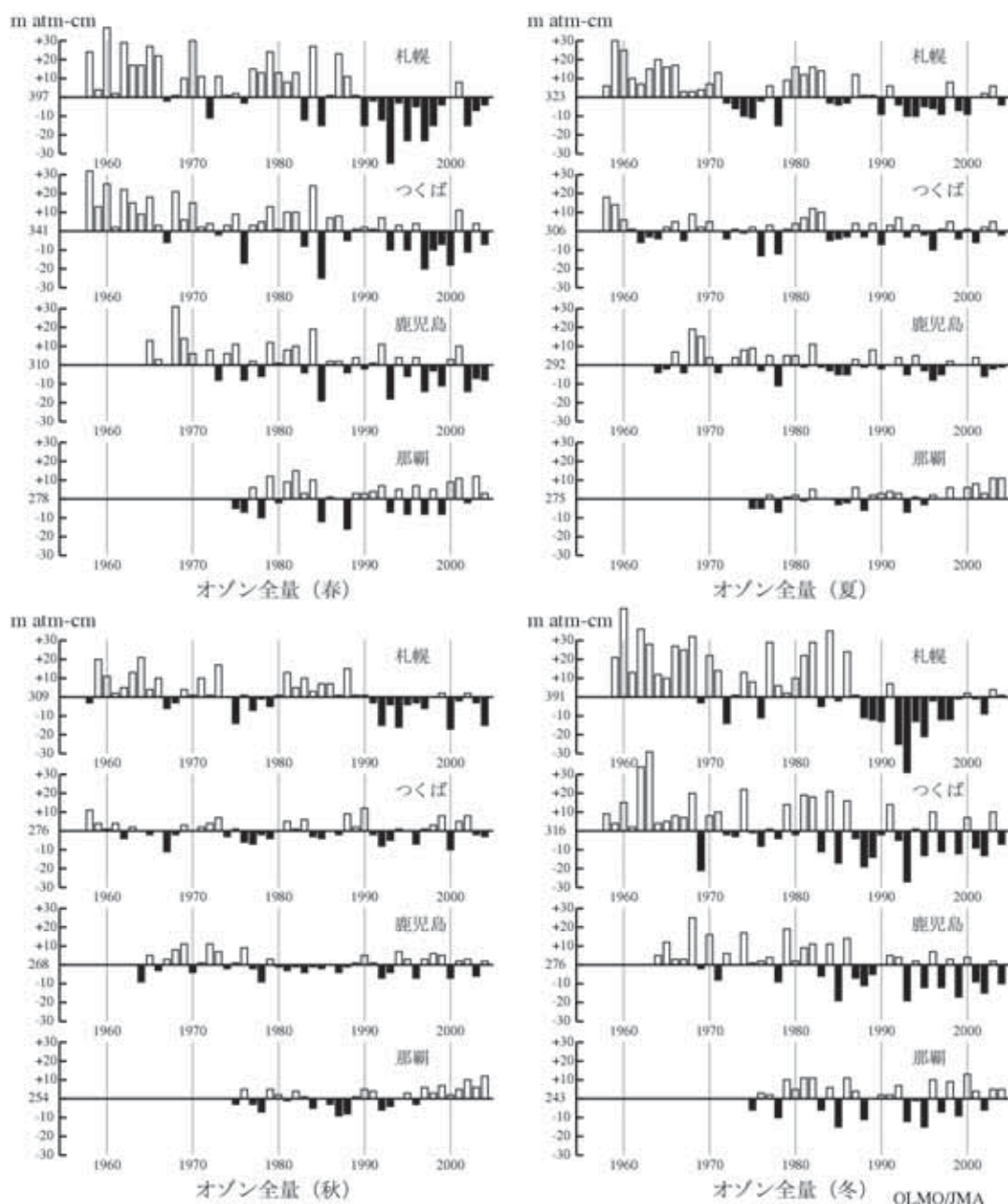


図3 - 3 - 2 : オゾン全量の季節平均値の推移

上段は春(3月～5月)、夏(6月～8月)、下段は秋(9月～11月)、冬(前年12月～2月)についての値。

と8月は全地点で増加トレンドを示している。

また、国内4地点についてドブソン計の反転観測による層別(第1～9層)のオゾン量及びオゾンゾンデ観測による指定気圧面(1000hPa～10hPa)のオゾン分圧についてもトレンド解析を行った。つくばの反転観測については、これまでの比較観測の結果に基づいて、過去の観測値の再計算を行ったデータを用いた。札幌、鹿児島、那覇のデータについては、測器の変更に伴う不連続が検出されており、今回の報告でその不連続点以前のデータに統計的な補正を行った。解析例として図3-3-5につくばの反転観測第8層(高度約38～43km)の結果を示す。上図は1970～2004年の月平均層別オゾン量(m atm-cm)、下図は上図から既知の自然変動を除去した結果と、最近20年間(1985～2004年)に関する回帰直線であり、そのトレンドは $-3.9 \pm 2.7\%/10$ 年である。また、図3-3-6はオゾンゾンデ観測による70hPa(約17km)と700hPa(約3km)について図3-3-5と同様の解析を行った結果を示したものであり、そのトレンドは70hPaで $-6.9 \pm 5.2\%/10$ 年、700hPaで $-4.0 \pm 3.1\%/10$ 年である。

図3-3-7は、反転観測とオゾンゾンデ観測の結果から求められたオゾン分圧トレンドの高度分布を示し

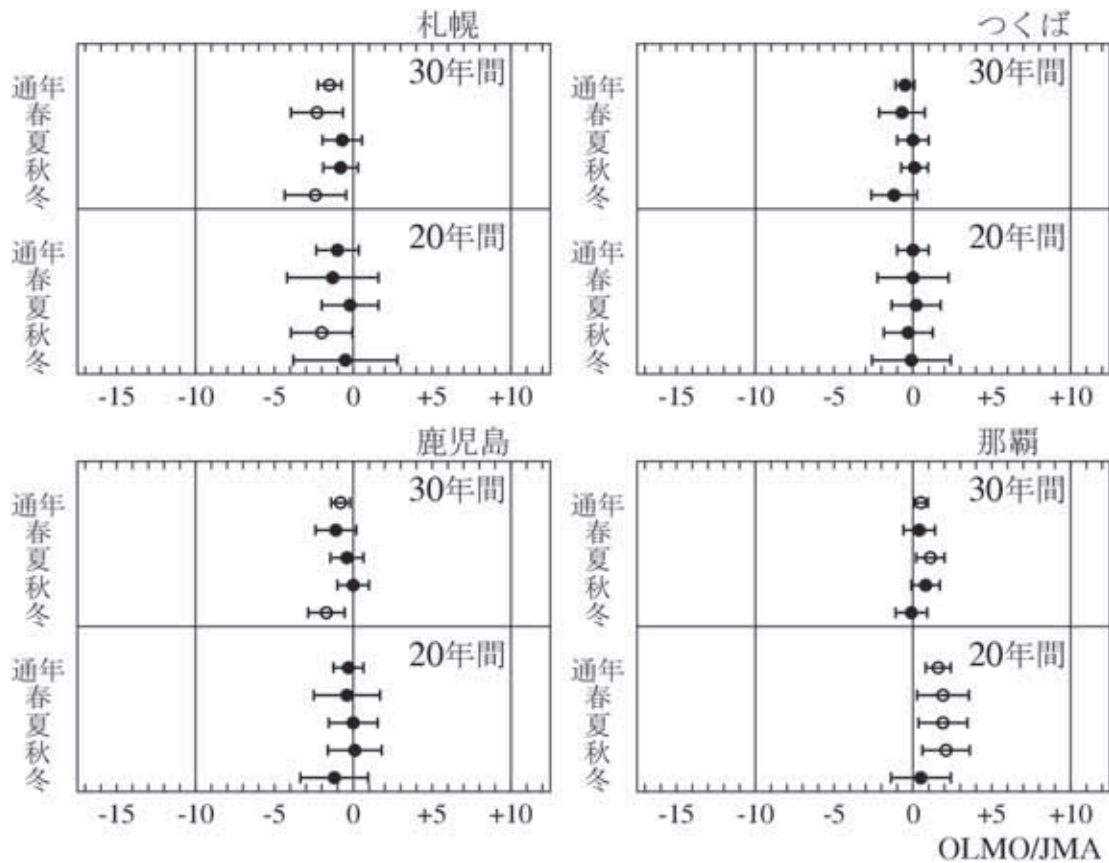


図3 - 3 - 3 : 日本上空のオゾン全量トレンドの季節変動

印及び 印は最近30年間(1975～2004年)と最近20年間(1985～2004年)について通年(1～12月)、春(3～5月)、夏(6～8月)、秋(9～11月)、冬(12～2月)に分けて評価したトレンド(%/10年)。実線の幅は95%信頼限界。印は統計的に有意なものである。

表3 - 3 - 1 : 日本上空のオゾン全量のトレンド

月平均オゾン全量の時系列から季節変動、太陽活動、QB0の影響を除去して算出した10年当たりの変化率(%/10年)。上段は30年間(1975～2004年)、下段は20年間(1985～2004年)のトレンド。()内は95%信頼限界であり、下線を付したものは統計的に有意なものである。

		札幌	つくば	鹿児島	那覇
通年	1975～2004	<u>-1.5(-2.3～-0.8)</u>	-0.5(-1.1～0.1)	<u>-0.8(-1.4～-0.2)</u>	<u>0.5(0.1～1.0)</u>
	1985～2004	-1.0(-2.3～0.4)	0.0(-1.0～1.0)	-0.3(-1.3～0.6)	<u>1.6(0.8～2.4)</u>
春 (3～5月)	1975～2004	<u>-2.3(-3.9～-0.6)</u>	-0.7(-2.2～0.7)	-1.1(-2.4～0.2)	0.4(-0.6～1.4)
	1985～2004	-1.3(-4.2～1.6)	0.0(-2.2～2.3)	-0.4(-2.5～1.7)	<u>1.9(0.2～3.5)</u>
夏 (6～8月)	1975～2004	-0.7(-1.9～0.6)	0.0(-1.0～1.0)	-0.4(-1.5～0.6)	<u>1.1(0.2～2.0)</u>
	1985～2004	-0.2(-2.0～1.6)	0.2(-1.4～1.7)	0.0(-1.5～1.6)	<u>1.9(0.3～3.4)</u>
秋 (9～11月)	1975～2004	-0.8(-1.9～0.3)	0.1(-0.8～0.9)	0.0(-1.0～1.0)	0.8(-0.1～1.7)
	1985～2004	<u>-2.0(-4.0～-0.1)</u>	-0.3(-1.9～1.2)	0.1(-1.6～1.8)	<u>2.1(0.6～3.6)</u>
冬 (12～2月)	1975～2004	<u>-2.4(-4.3～-0.4)</u>	-1.2(-2.7～0.2)	<u>-1.7(-2.8～-0.5)</u>	-0.1(-1.1～0.9)
	1985～2004	-0.5(-3.8～2.8)	-0.1(-2.6～2.4)	-1.2(-3.3～1.0)	0.5(-1.4～2.4)

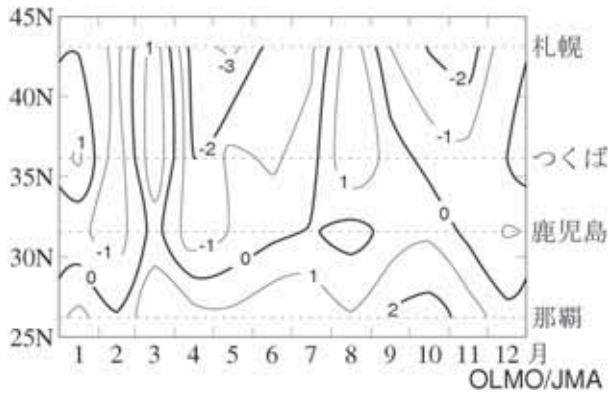


図3 - 3 - 4 : 日本上空のオゾン全量トレンドの緯度別季節変動
最近20年間(1985 ~ 2004年)のオゾン全量の月別トレンド(%/10年)

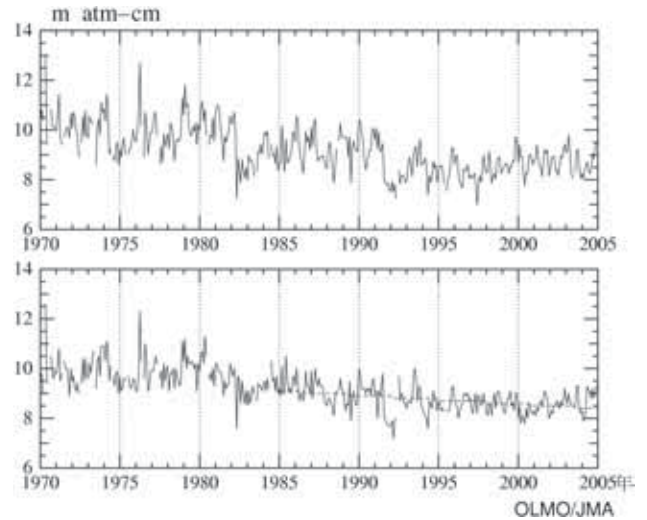


図3 - 3 - 5 : 反転観測データによるトレンド解析例
上図はつくばの反転観測第8層(約38 ~ 43km)の1970年からの月平均層別オゾン量(m atm-cm)。下図は上図データから、原因が既知の自然変動(季節変動、太陽活動、QBO、大気混濁度の影響)を除去した結果とその1985 ~ 2004年の20年間に
関する回帰直線(破線)。

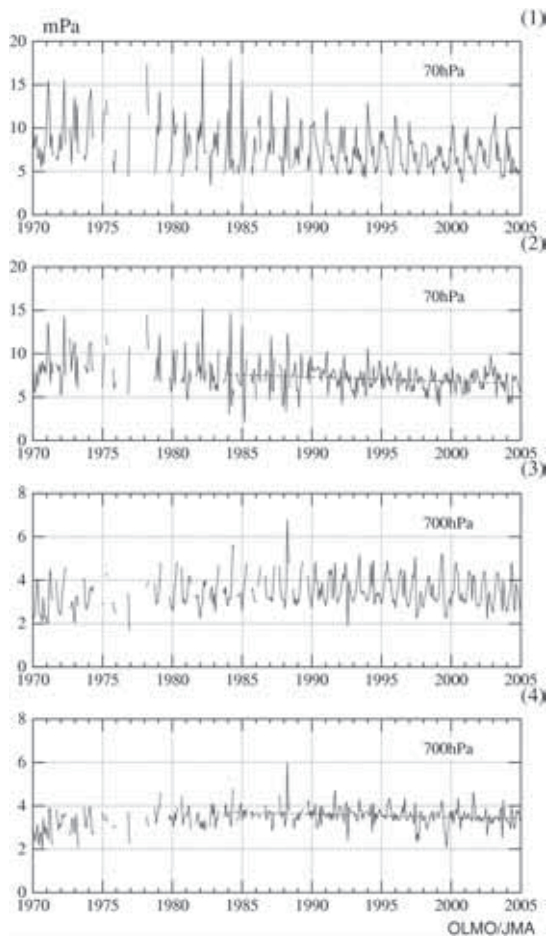


図3 - 3 - 6 : オゾンゾンデデータによるトレンド解析例
つくばにおけるオゾンゾンデ観測による70hPa(高度約17km)と700hPa(高度約3km)のオゾン分圧の経年変化。(1)と(3)は1970年以降の月平均値(mPa)、(2)と(4)はそれぞれ(1)と(3)から原因が既知の自然変動を除去した結果で、破線はその1985 ~ 2004年の20年間に
関する回帰直線。

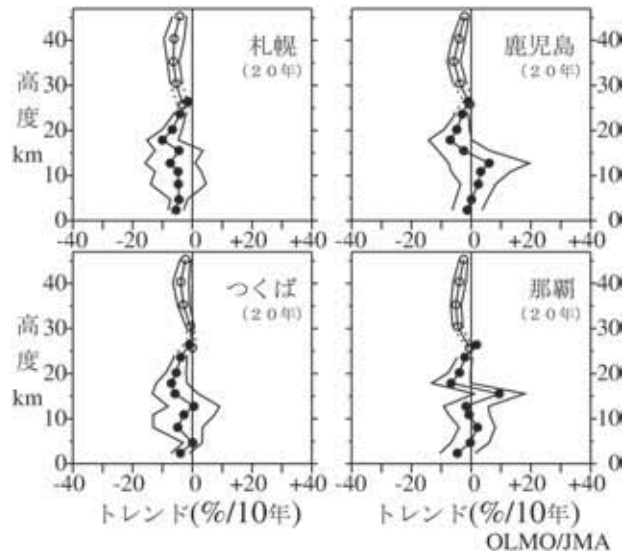


図3 - 3 - 7 : オゾントレンドの高度分布

オゾンゾンデ観測と反転観測による、最近20年間(1985 ~ 2004年)の月平均オゾン分圧と月平均層別オゾン量を基に評価した高度別トレンド(%/10年)。印はオゾンゾンデ観測データ、印は反転観測データによる。細い折線は自己回帰を考慮した95%信頼限界。なお、那覇のオゾンゾンデ観測によるトレンドは、観測を開始した1989年以降の16年間についての値である。

たものである。下部成層圏でオゾンの減少トレンドが現れており、特に札幌で顕著である。また、上部成層圏を中心に全観測所では有意な減少トレンドが現れている。このように、オゾン層の破壊は、日本上空でも上部成層圏と下部成層圏の二つの高度領域で起こっている。一方、対流圏では、那覇でオゾンの増加トレンドが現れている。

3 - 4 南極域上空のオゾンホールの長期変化

図3 - 4 - 1は、昭和基地におけるドブソン計による月平均オゾン全量について、1966～2004年の春季から秋季にかけての経年変化を示す。昭和基地上空はオゾンホールの縁辺となることが多く、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、オゾンホールの時期にあたる9～12月は、年毎にばらつきはあるものの1980年ごろからオゾンが減少しているのがわかる。この中で、2002年の9～11月のオゾン全量が急増しているが、これは2002年の南極域では、9月の成層圏の気温が過去50年で最高となり、極渦が不安定となる特異な気象条件により、大規模なオゾン破壊が生じなかったからである。一方、オゾンホールが解消した後の時期にあたる1～3月についても、長期的なオゾン全量の減少傾向が見られる。昭和基地のオゾン全量データに3 - 1節のトレンド解析の手法を適用すると、オゾンが減少しはじめた1980年以降のトレンドは通年で $-6.9 \pm 5.3\%/10$ 年、9～11月で $-11.1 \pm 14.4\%/10$ 年になる。図3 - 4 - 2に10月の昭和基地における150、100、70、50、30hPa（それぞれ高度約12、15、17、19、22km）のオゾン分圧の経年変化を示す。各高度ともオゾン全量と同様に1980年頃から減少が顕著に現れている。1992年頃に150hPaで極小値を示しているのは、ピナトゥボ火山噴火（1991年6月）に起因した成層圏エアロゾル粒子表面での不均一反応のため、オゾン破壊が促進された影響と考えられる。特に100、70、50hPaでは、1992～1995年頃から、2002年を除いてオゾン分圧が0に近く、オゾンがほとんど破壊されている状況が続いている。ここで示す高度は、2 - 3 - 2節で示したようにオゾンホールの発達に伴うオゾン減少が大きい高度であるため、オゾンホールの長期的な変化傾向の良い指標となる。2002年の30hPaから150hPaの各高度でオゾン分圧が高くなっているのは、先に示したように特異な気象条件によるものである。

図3 - 4 - 3に、オゾンが減少しはじめた1980年以降のオゾンゾンデ観測による高度別オゾン分圧のトレンドを示す。高度15km（約100hPa）付近でのオゾン減少が大きく、春季（9～11月）に顕著である。

図3 - 4 - 4に、昭和基地における最近30年間のオゾン分圧と気温の高度分布の月別トレンドを示す。オ

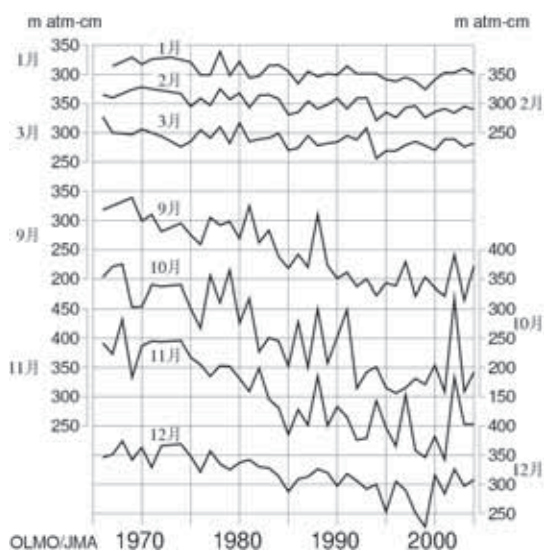


図3 - 4 - 1 : 南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化

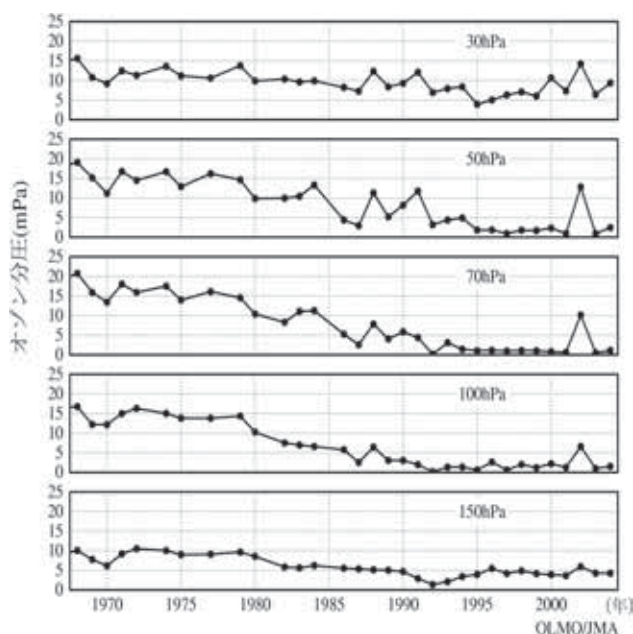


図3 - 4 - 2 : 南極昭和基地における150、100、70、50及び30hPaの10月の月平均オゾン分圧の経年変化

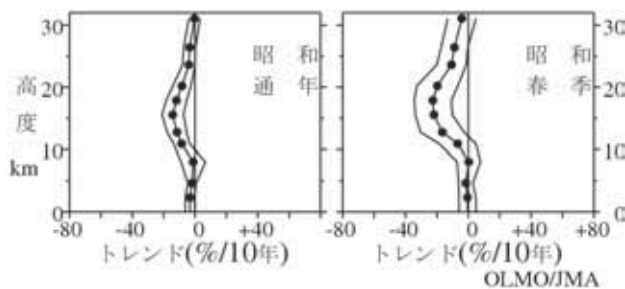


図3 - 4 - 3 : 南極昭和基地におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

印はオゾンゾンデ観測によるオゾンホールが観測された以降(1980~2004年)の月平均オゾン分圧を基に評価した高度別トレンド(%/10年)。細い折線は自己回帰を考慮した95%信頼限界。左が通年、右が春季(9~11月)。

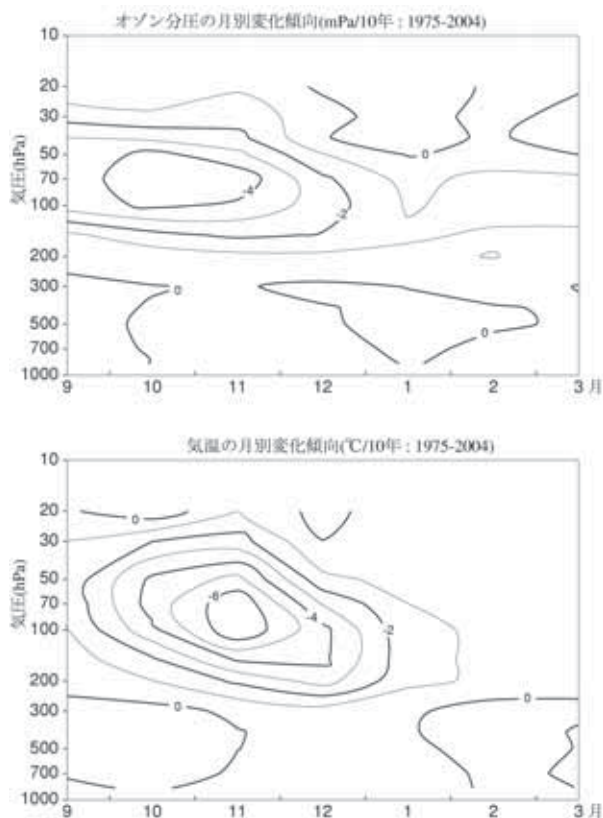


図3 - 4 - 4 : オゾン及び気温の高度分布の月別トレンド

上図は最近30年間(1975~2004年)のオゾン分圧の月別トレンド(単位はmPa/10年)。下図は同期間の気温の月別トレンド(単位は°C/10年)。

ゾン分圧の減少のピークは10、11月の100~70hPa付近に現れており、4mPa/10年を超える減少を示している。11月以降、オゾン分圧の減少の大きな領域は次第に下層へと移っている。一方、気温は11月に100~70hPa付近で6°C/10年以上の低下を示している。また、オゾンと同様に、気温が低下した領域は11月以降下層へ移っている。このように気温の低下はそれに先立つオゾン減少と対応しており、オゾンの減少に伴って紫外域日射の吸収による大気加熱が減ったことが主な原因と考えられる。

図3-4-5に、TOMSデータにより作成した南半球の10月の月平均オゾン全量分布図を示す。1995年はTOMSのデータが得られなかったため、SBUV/2のデータにより作成した。なお、1993年10月及び1994年10月については最新の処理方法(Ver.8)によるデータが公表されていないので、古い処理方法(1993年はVer.6、1994年はVer.7)によるデータから作成した図を参考のため掲載した。南極域上空の10月の月平均オゾン全量は、1979年には世界の平均値である約300m atm-cm前後であったが、1980年に220m atm-cm以下の領域が現れ、その後、1983年に190m atm-cm以下の領域も出現し、1987年以降は1988年と2002年を除き毎年160m atm-cm以下の領域が現れている。特に1993年、1995~2001年、2003年には130m atm-cm以下の領域も現れている。

図3-4-6に、オゾンホールの面積、最低オゾン全量及びオゾン欠損量(破壊量)の極値の経年変化を示す。これらによれば、2002年と2004年のオゾンホールの規模は最近の他の年と比較すると小さかったものの、これは気象状況によるものであり現時点でオゾンホールに縮小する兆しがあるとは判断できない。

図3-4-7に、オゾンホールの目安である220m 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が、その後は11月と12月の間で変動している。2004年は、大規模なオゾンホールの発生年の中では平均的な消滅日であった。

WMO/UNEPの「オゾン層破壊の科学アセスメント: 2002」が指摘するように、モントリオール議定書の完全遵守をもってしても、オゾン層は今後10年程度は現在のように脆弱なままであり、まだしばらくは大規模なオゾンホールが引き続き出現するものと考えられる(WMO, 2003)。

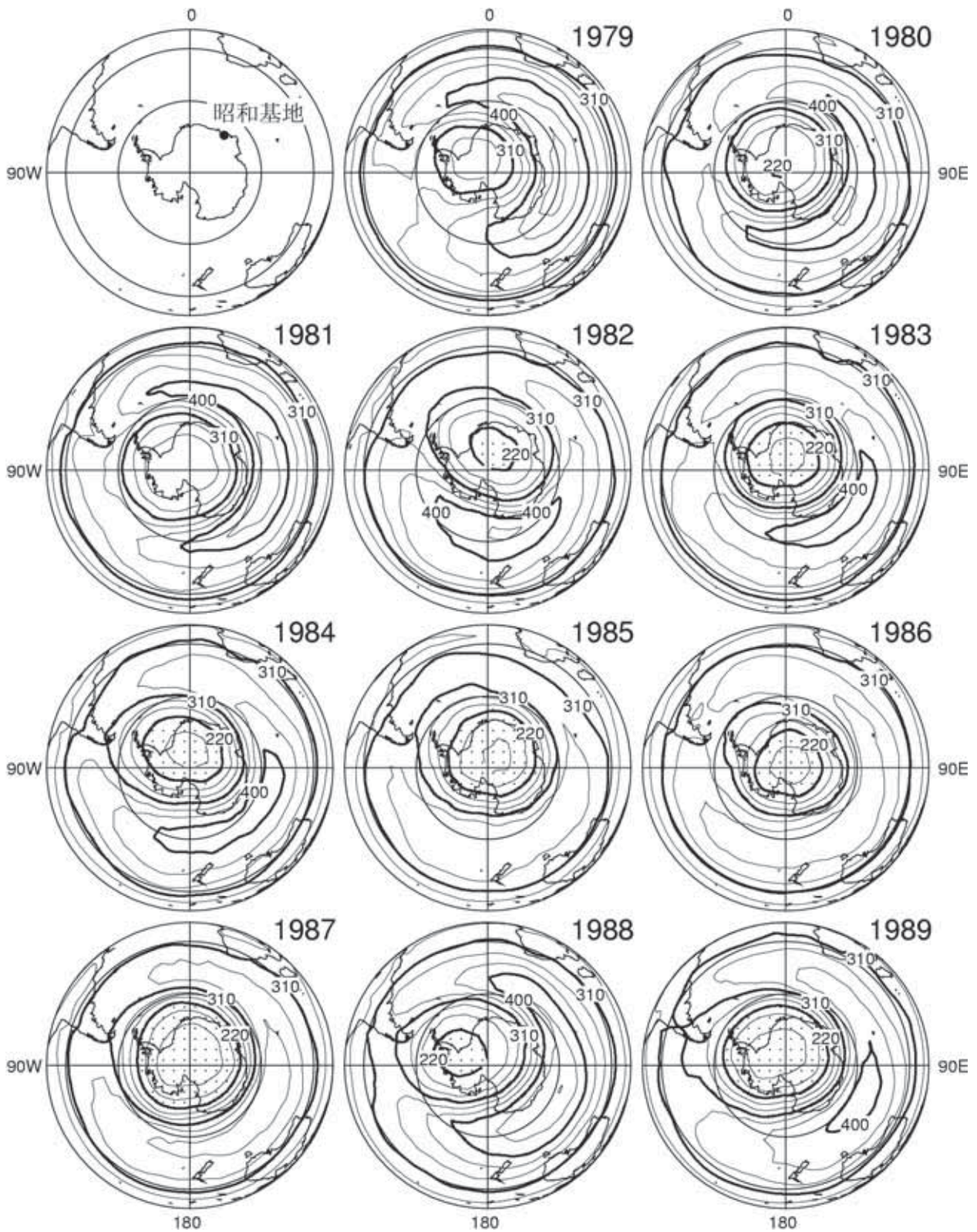


図3 - 4 - 5 (1) : 10 月の月平均オゾン全量の南半球分布図

等値線間隔は30m atm-cm。 NASA 提供の TOMS データを基に気象庁で作成。なお、点域は220m atm-cm 以下の領域。

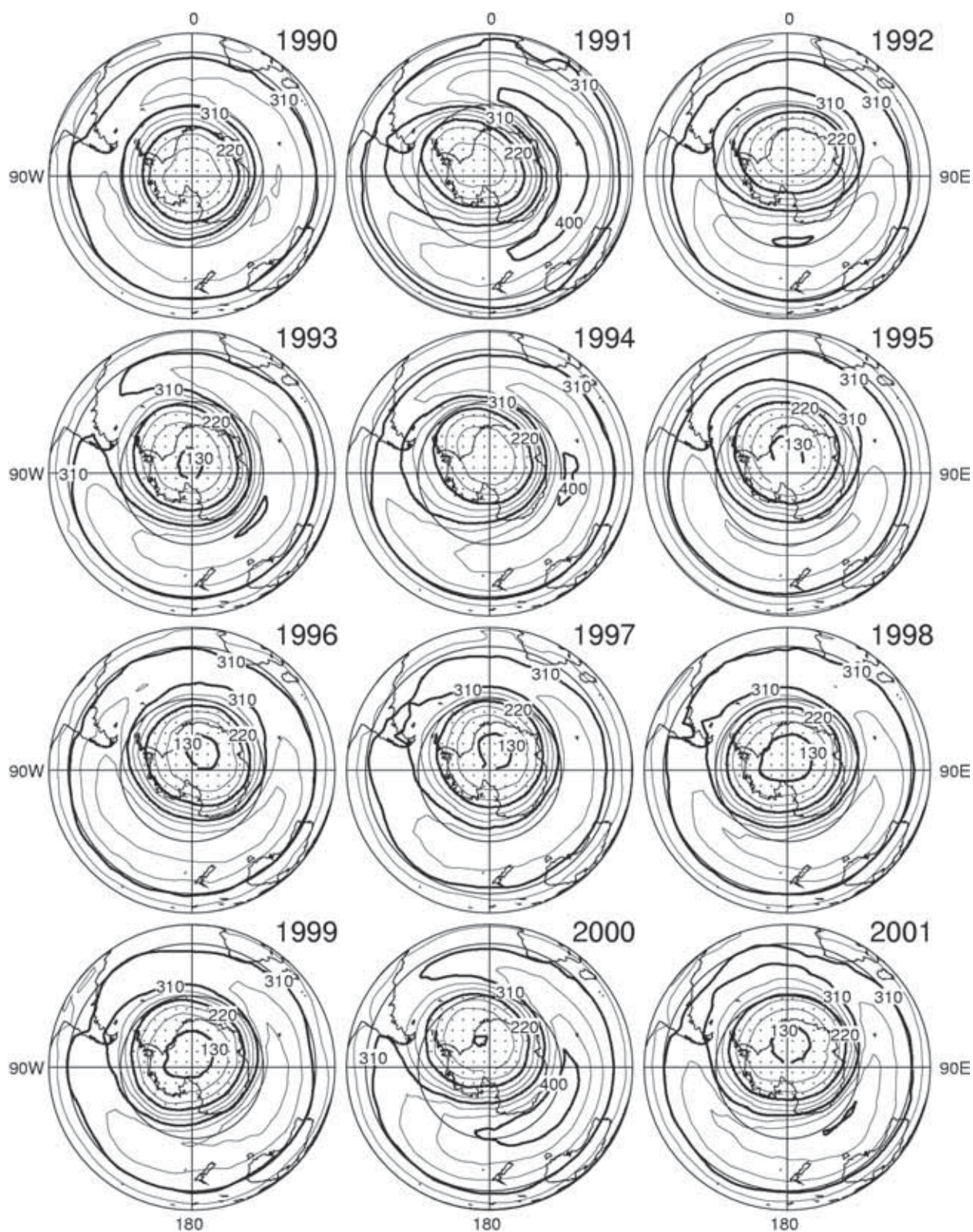


図3 - 4 - 5 (2) : 10 月の月平均オゾン全量の南半球分布図

前ページから続く。1993年は旧アルゴリズム (Ver.6)、1997年は Ver.7 による。1995年については、SBUV/2 のデータを用いて作成した。

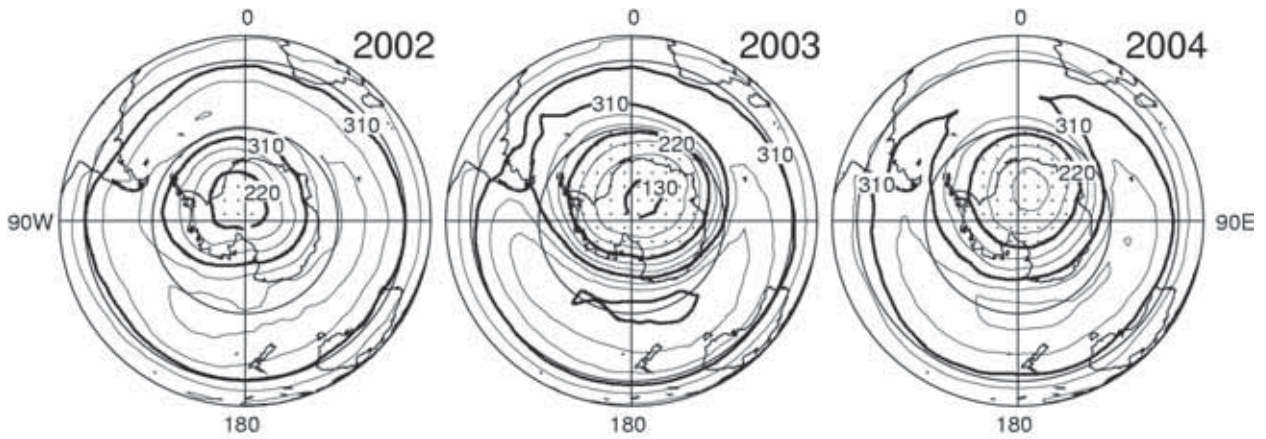


図3 - 4 - 5 (3) : 10月の月平均オゾン全量の南半球分布図
前ページから続く。

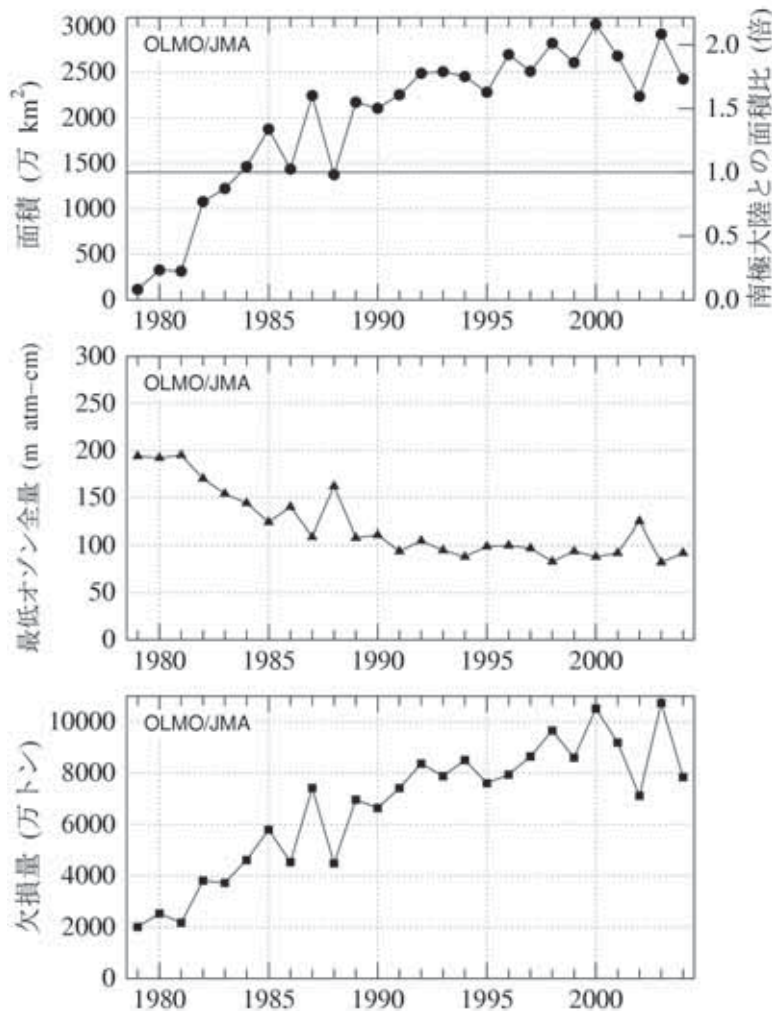


図3 - 4 - 6 : オゾンホール規模の経年変化

1979 ~ 2004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TOMSデータを基に作成。1995年については、TOVSの高分解能赤外放射計のデータを用いて作成。

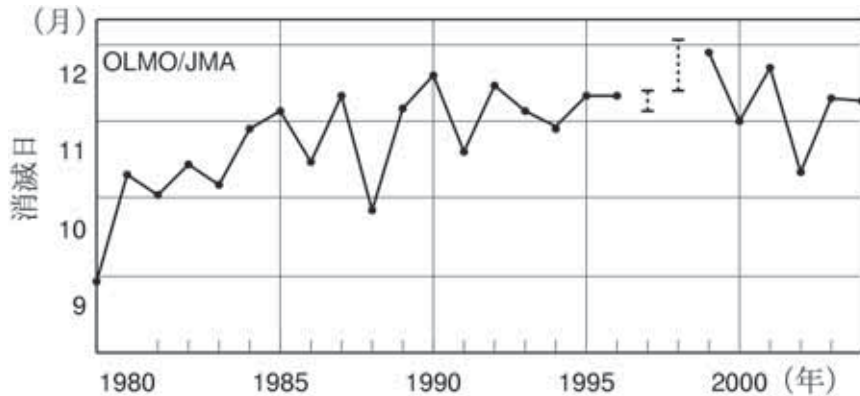


図3 - 4 - 7 : 南極域で220m atm-cm以下の領域が見られなくなった日の経年変化

1979～2004年の220m atm-cm以下の領域が消滅した時期の推移。NASA提供のTOMSデータを基に作成。なお、1997年及び1998年は、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。1995年についてはSBUV/2のデータを基に作成。

(解説) オゾンホール規模の統計的な推定法について

オゾンホール規模を表すパラメータとして、オゾン欠損量を取り上げ、その年の最大値を支配する因子を調査した結果、オゾン欠損量は、オゾン層破壊物質濃度と、6月及び8月の成層圏の温度場(実際には30hPa面における-78℃以下の面積)の3つの要因でかなりの部分を説明できることが示された(気象庁,1993、伊藤他,1993)。オゾン欠損量(M)を目的変数として下記の重回帰式

$$M_i = a \cdot X_i + b \cdot Y_i + c \cdot Z_i$$

を設定する。添え字 i は年の番号を表す。 X と Y は温度場の説明変数で、それぞれ6月と8月における30hPa面の月平均温度が-78℃以下の低温域の面積である。 Z はオゾン層破壊物質の濃度を表現する説明変数で、大気中のクロロフルオロカーボン等による塩素濃度をモデル化した数列を与えた。それぞれの年の M 、 X 、 Y 、 Z の値は、データ期間の平均値からの偏差の百分率で与えている。 a 、 b 、 c はそれぞれの説明変数の目的変数に対する寄与の度合いを表現する係数である。影響の大きさは、オゾン層破壊物質の濃度、8月の低温域の面積、6月の低温域の面積の順である。この重回帰式による重相関係数は約0.98であり、自由度調整済みの決定係数は約0.94であることから、この重回帰式はオゾン欠損量の予測に有用である。

気象庁では、オゾンホールに関する報道発表等で、この手法を用いてオゾンホール規模の予測を公表している。