

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(QB0)といった既知の自然要因と相関する変動成分を除去したときの2003年までの変化率(トレンド:10年当たりの変化を百分率で表す)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2003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、QB0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3-1-3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、約2年周期のQB0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大気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も使用

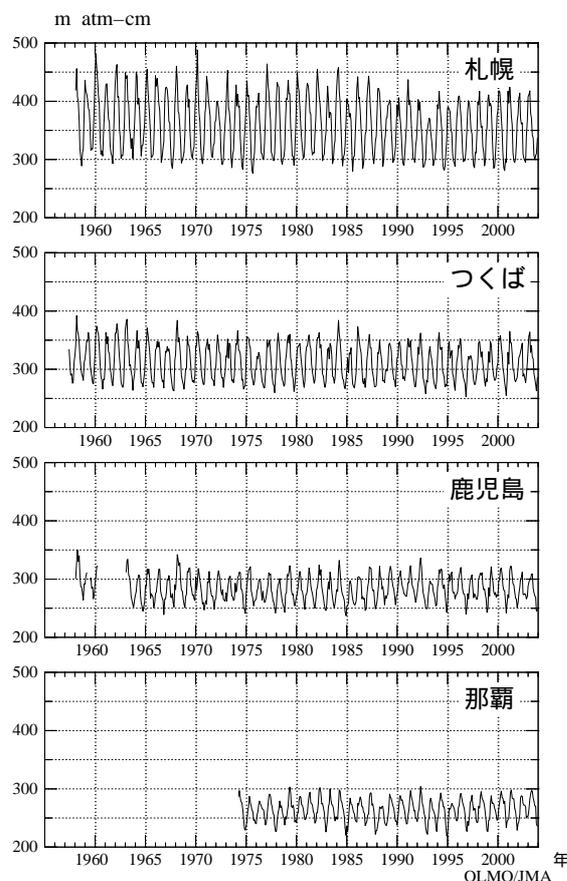


図3-1-1: 日本上空のオゾン全量の月平均値
札幌、つくば、鹿児島、那覇についての観測開始から
2003年12月までのオゾン全量の月平均値。

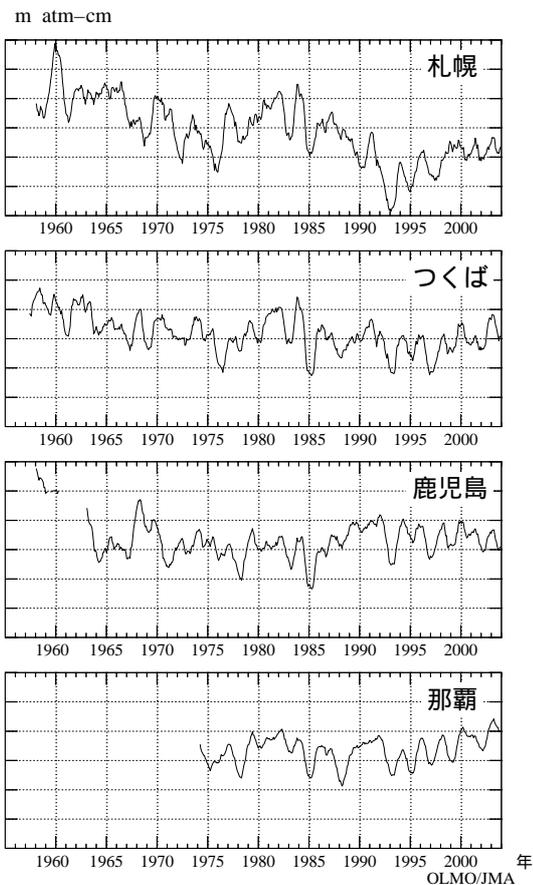


図3-1-2: 季節変動除去後のオゾン全量の推移
図3-1-1のデータから季節変動を除去した後、13カ月
移動平均をした。

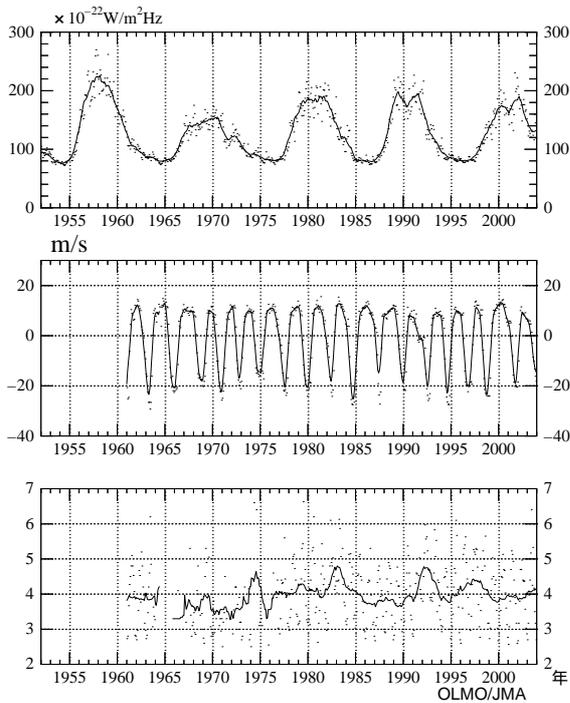


図3 - 1 - 3 :トレンド解析に使用する既知の自然要因

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 $10^{-22} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$)で、実線は13 カ月移動平均値。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)、実線は7 カ月移動平均値。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 カ月移動平均値。

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QB0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QB0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。
- 2)この回帰式を用いて、太陽電波フラックスとQB0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(全年及び季節・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%信頼限界を評価する。

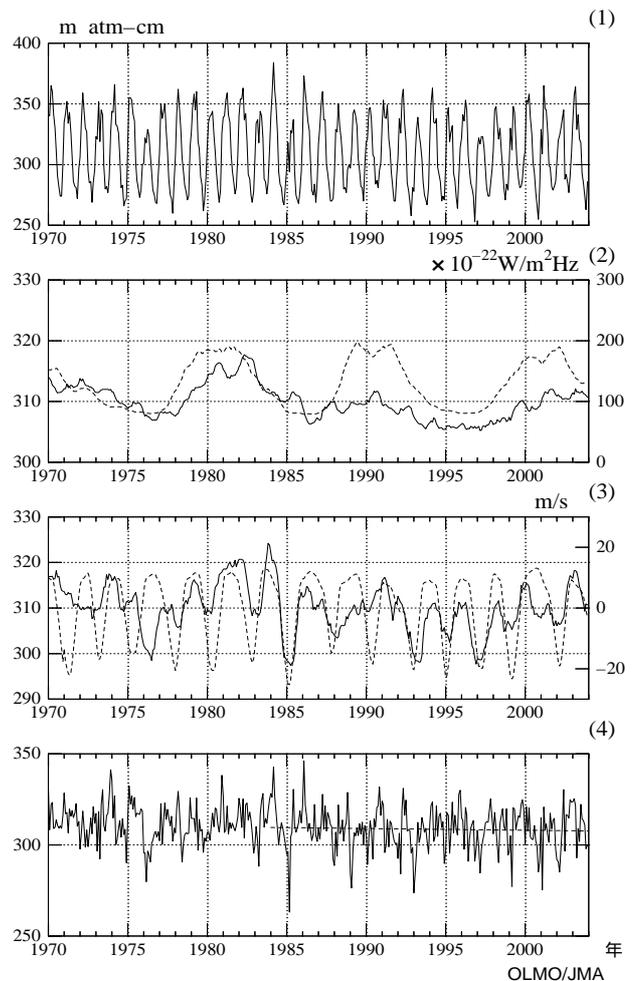


図3 - 1 - 4 :つくばにおけるオゾン全量のトレンド解析例

(1)月平均値、(2)月平均偏差の49 カ月移動平均値(太線)と、太陽電波フラックスの13 カ月移動平均値(破線)、(3)月平均値から季節、太陽活動の影響を取り除いた時系列の13 カ月移動平均値(太線)とQB0 の7 カ月移動平均値(破線:ラグあり)、(4)季節変動、太陽活動及びQB0 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)。

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、2003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当たっては、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じ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(1984 ~ 2003年)の全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、全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。特に北半球の北緯30度以北では全年及び3 ~ 5月に有意な減少トレンド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。但し、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日本以外の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

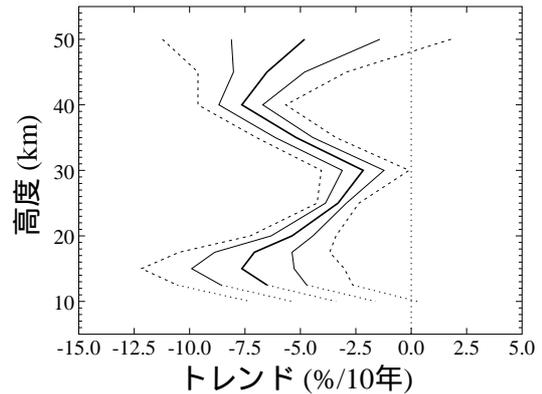


図3 - 2 - 1 : オゾンのトレンドの高度分布
1980 ~ 1996年のSAGE 1/11、SBUV、オゾンゾンデ、反転観測データを基に作成した北半球中緯度の高度別オゾンのトレンド(%/10年)。実線がトレンドと68%の信頼限界、破線は95%の信頼限界(WMO, 1998)

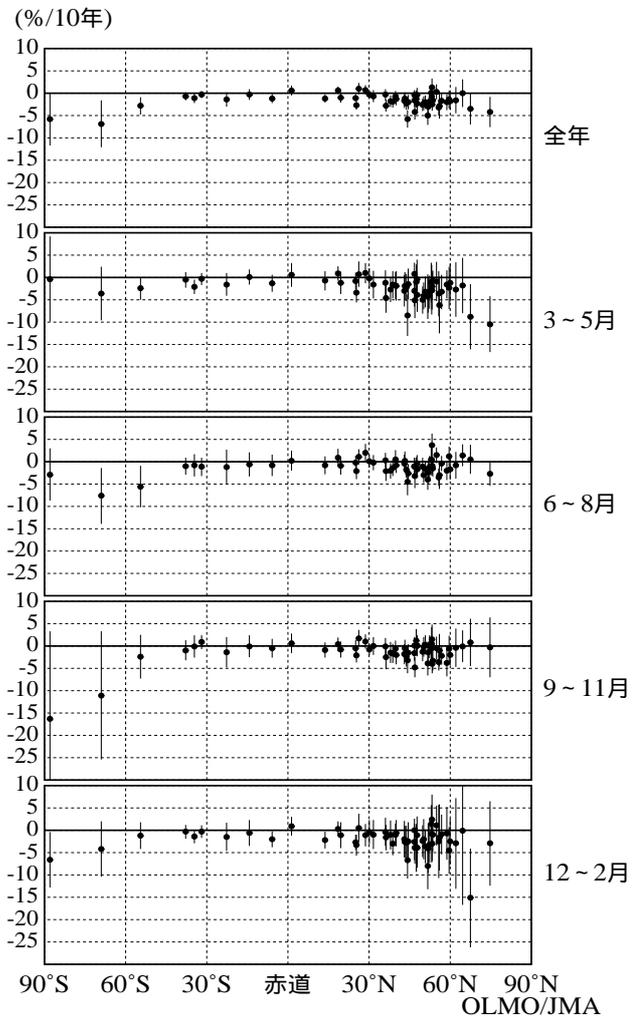


図3 - 2 - 2 : 地上観測データによる20年間のオゾン全量トレンドの緯度分布

1984 ~ 2003年の各観測地点(58地点)におけるオゾン全量のトレンド。横軸が緯度、縦軸がトレンド。それぞれの点が各観測地点におけるトレンドを示し、縦棒はそのトレンドの95%信頼限界の範囲。上から順に、全年、3 ~ 5月、6 ~ 8月、9 ~ 11月、12 ~ 2月におけるトレンド(単位は%/10年)。

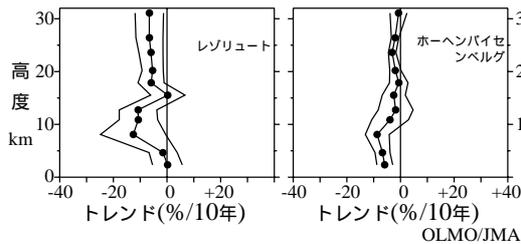


図3 - 2 - 3 : 北半球の2 地点におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

オゾンゾンデ観測による月平均オゾン分圧を基に評価した最近20年間(1984 ~ 2003年)の高度別オゾントレンド(%/10年)(印)と自己回帰を考慮した95%信頼限界(細い折れ線)。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グ(ドイツ、北緯47.80度、東経11.02度)。

のトレンドは全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グとも下部成層圏のオゾン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付近で有意な減少トレンドが見られる。

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には2000年の中頃より観測装置に起因する誤差(主に光学系の特性変化)が見られるようになったため、現在、NASA(米国航空宇宙局)でデータの見直しが行われている。そのため、ここで述べるTOMSデータを用いたトレンドの算出については、2000年までのデータを用いた『オゾン層観測報告:2000』(気象庁、2001)の結果をそのまま紹介する。なお、1995年の全年と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、緯度幅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、北半球の北緯40度以北及び南半球の南緯30度以南で統計的に有意な減少トレンドを示している。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~南緯60度の平均でも $-0.8 \pm 0.7\%/10$ 年の有意な減少トレンドになっている。

図3-2-5に示すオゾン全量トレンドの全球分布によれば、同じ緯度帯でも経度によりトレンドの値が異なる。全年では、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

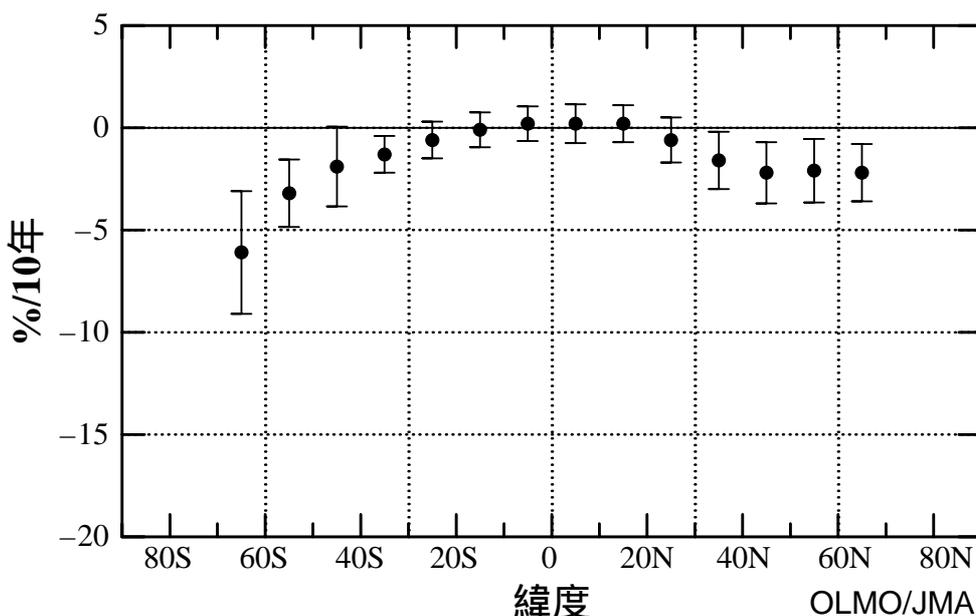


図3 - 2 - 4 : TOMS オゾン全量トレンドの緯度分布

緯度10度毎の緯度別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。NASA提供のTOMSデータから評価。

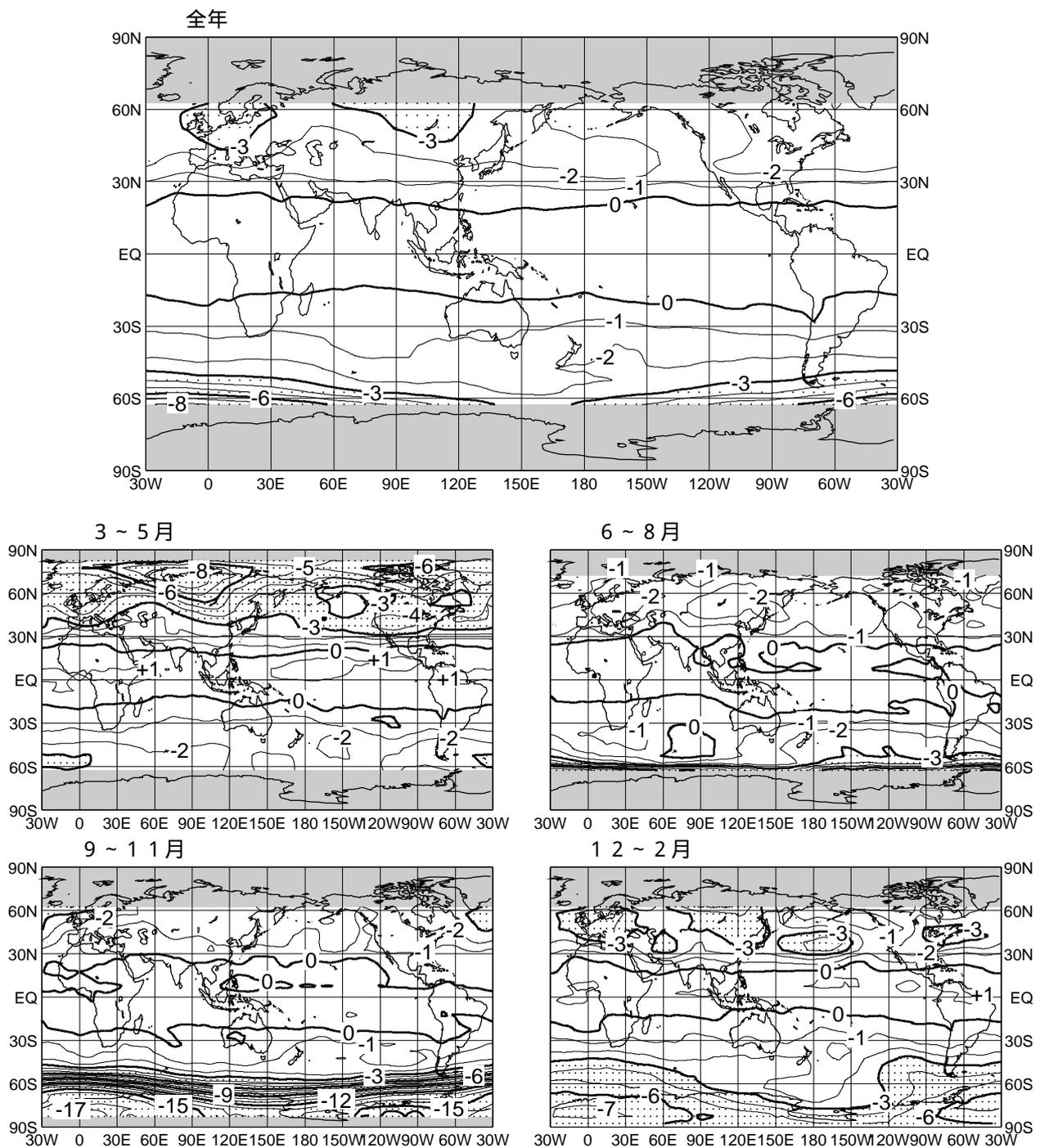


図3 - 2 - 5 : TOMS オゾン全量トレンドの全球分布

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。上段は全年、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 年毎。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。

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少なく、南アメリカ南方からアフリカ南方上空にかけて減少率が大きい。季節別に見ると、北半球では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、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3%/10年を超える減少域が広がっている。南半球では3 ~ 5月を除いて高緯度でのオゾン減少が顕著に見られ、南半球の春季 (9 ~ 11月)、夏季 (12 ~ 2月) には中緯度でも3%/10年以上の減少域が広がっている。

図3 - 2 - 6には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。

北半球高緯度の状況を見るために、年毎の3、4月のオゾン全量の偏差を北緯90度～北緯60度について図3 - 2 - 7に示す。北半球高緯度でも春季に顕著なオゾン減少が現れており、特に1997年春季は大規模であった。2003年春季にも、20 m atm-cmを超えるオゾン減少が見られた。1990年以降、データの無い1995、1996年を除き、20m atm-cm以上の負偏差が12年のうち6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

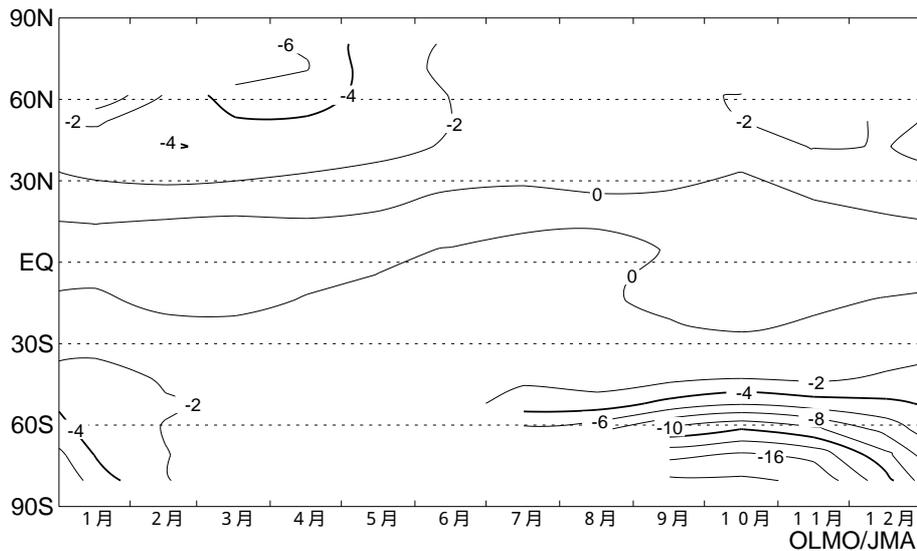


図3 - 2 - 6 : TOMS オゾン全量トレンドの緯度別季節変動

緯経度格子点(5度メッシュ)の月平均オゾン全量(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(単位は%/10年)の季節変動。等値線間隔は2%/10年毎。NASA提供のTOMSデータから評価。なお、TOMS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。

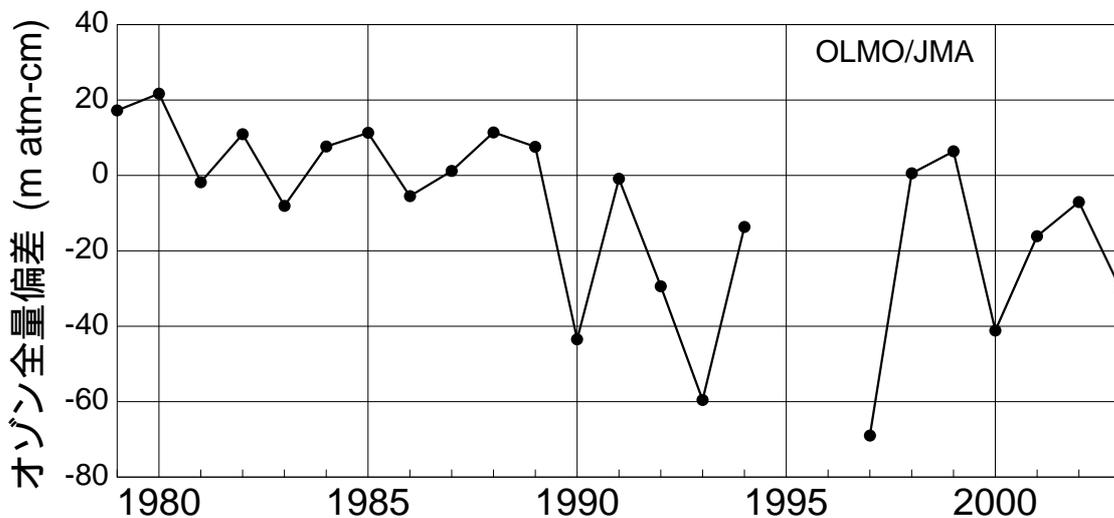


図3 - 2 - 7 : 北半球高緯度の3、4月のオゾン全量偏差の推移

北半球高緯度(60-90N)の3、4月の平均オゾン全量の参照値(1979～1992年の平均)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。

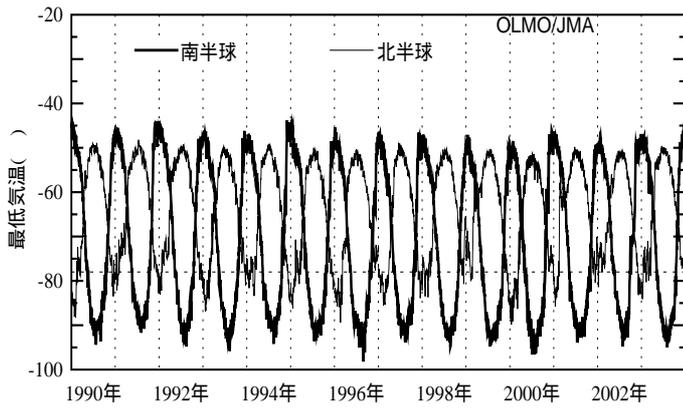


図3 - 2 - 8 : 高緯度域の最低気温の経年変化

北緯60度以北、南緯60度以南の50hPa面の日別最低気温。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。気象庁全球解析データを基に作成。

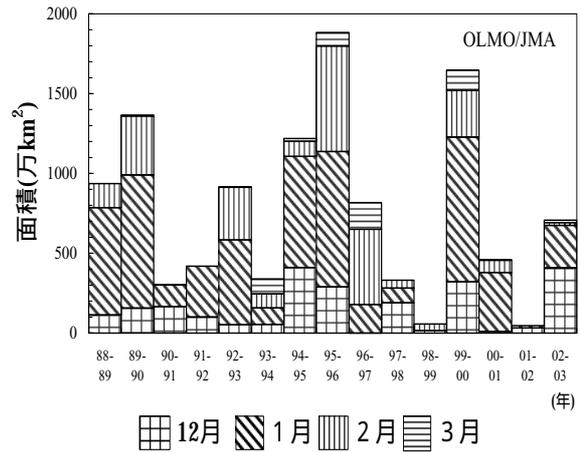


図3 - 2 - 9 : 北半球高緯度の低温域の面積の月平均値の推移

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。気象庁全球解析データを基に作成。

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。このことから北半球高緯度のオゾン破壊は年々変動が大きくなっている。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。

極域のオゾン変動には、輸送の変動も影響していると考えられる。冬季、極渦が安定して存在すると、その渦内では成層圏が低温化するとともに、低緯度域から極域へのオゾン輸送が少なくなる。これに加えて、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と、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。

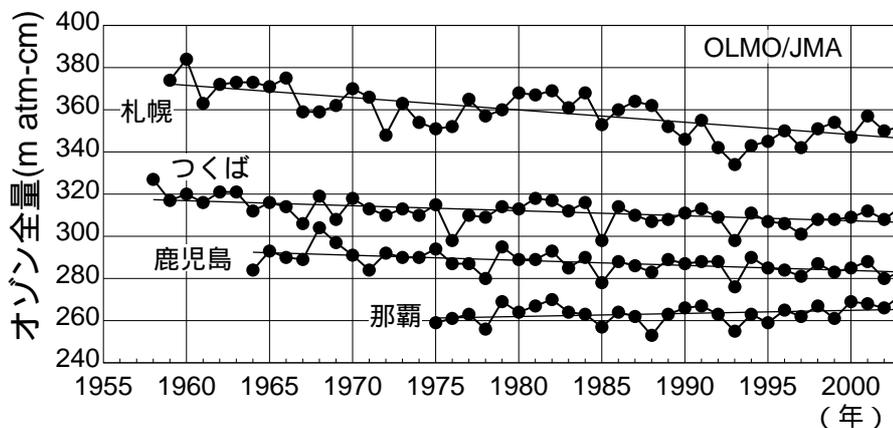


図3 - 3 - 1 : 日本上空のオゾン全量の年平均値の推移

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2003年までの年平均値。直線は全期間の長期的な傾向。