

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。この原因と考えられているのが、クロロフルオロカーボンなどの人為起源オゾン層破壊物質によるオゾン破壊である。この破壊メカニズムは大きく分けて2つに分類でき、それが起こる領域も異なっている。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、高度40km付近と高度15km付近にオゾン減少の極大が現れている(WMO, 1998)。高度40km付近については、クロロフルオロカーボン等から光解離して存在する塩素原子が直接的な触媒反応サイクルによってオゾンを破壊している。高度15km付近については、クロロフルオロカーボン等に起因した塩素原子は通常、塩化水素(HCl)や硝酸塩素(ClONO₂)等の安定した物質として存在しているが、エアロゾルが存在するとその表面上での不均一反応(異相反応ともいわれる)により活性な塩素が生成される。この活性塩素が、この高度領域で機能する別の触媒反応サイクルによってオゾンの破壊を引き起こしている(WMO, 1999)。

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、2002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用いて、地点毎に季節変化、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(1983 ~ 2002年)の緯度毎のオゾン全量トレンドを示している。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って、10%/10年を超える減少を示している。

これらの解析結果から、最近20年間のオゾン全量

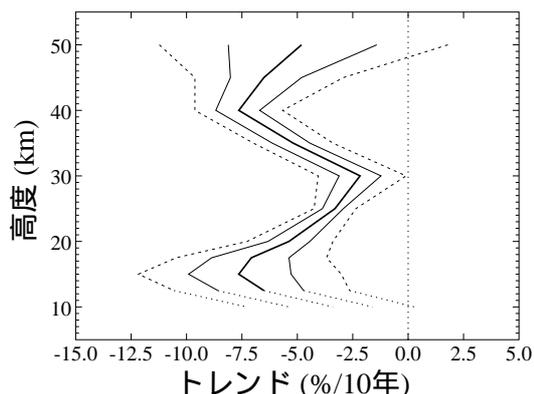


図3 - 2 - 1 : オゾンのトレンドの高度分布
1980 ~ 1996年のSAGE 1/11、SBUV、オゾンゾンデ、反転観測データを基に作成した北半球中緯度の高度別オゾンのトレンド(%/10年)。実線がトレンドと68%の信頼限界、破線は95%の信頼限界(WMO, 1998)。

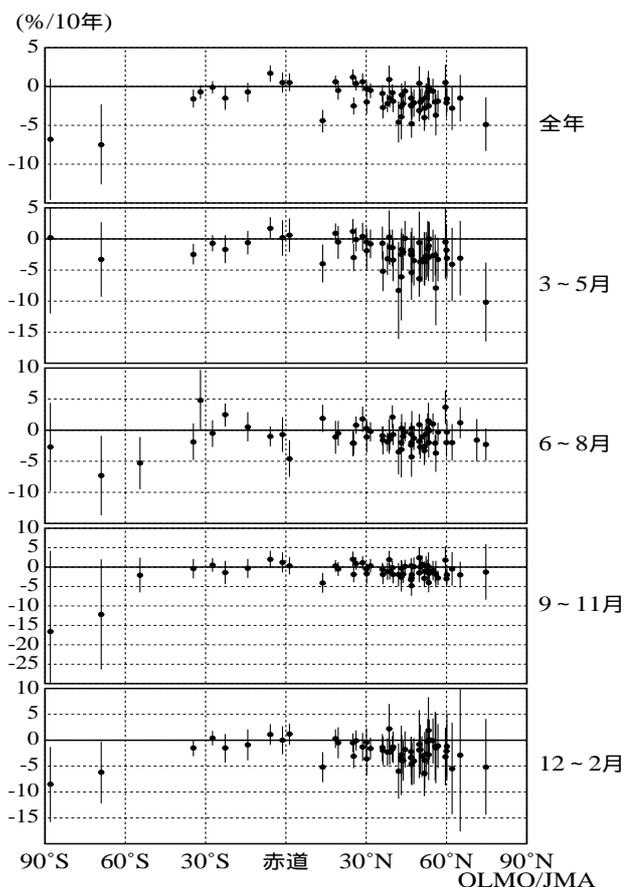


図3 - 2 - 2 : 地上観測データによる20年間のオゾン全量トレンドの緯度分布

1983 ~ 2002年の各観測地点(99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(%/10年)。

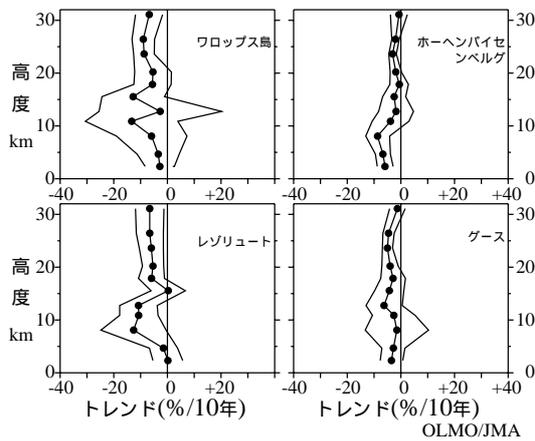


図3 - 2 - 3 : 北半球の4 地点におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布
 オゾンゾンデ観測による月平均オゾン分圧を基に評価した最近20年間(1983 ~ 2002年)の高度別オゾントレンド(%/10年)(印)と自己回帰を考慮した95%信頼限界(細い折れ線)。左上がフロップス島(米国、北緯37.93度、西経75.48度)、右上がホーヘンハイゼンベルグ(ドイツ、北緯47.80度、東経11.02度)、左下がレゾリュート(カナダ、北緯74.72度、西経94.98度)、右下がグース(カナダ、北緯53.32度、西経60.30度)。

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日本以外の主な4地点について、3 - 1節で述べた手法に従ってオゾン分圧トレンドの高度分布を求めた。なお、このトレンドは全年について計算している。これによれば、どの地点でも下部成層圏のオゾン減少傾向が見られており、特にカナダ北部のレゾリュート(北緯74.72度、西経94.98度)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化によるものである(WMO, 1999)。

第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

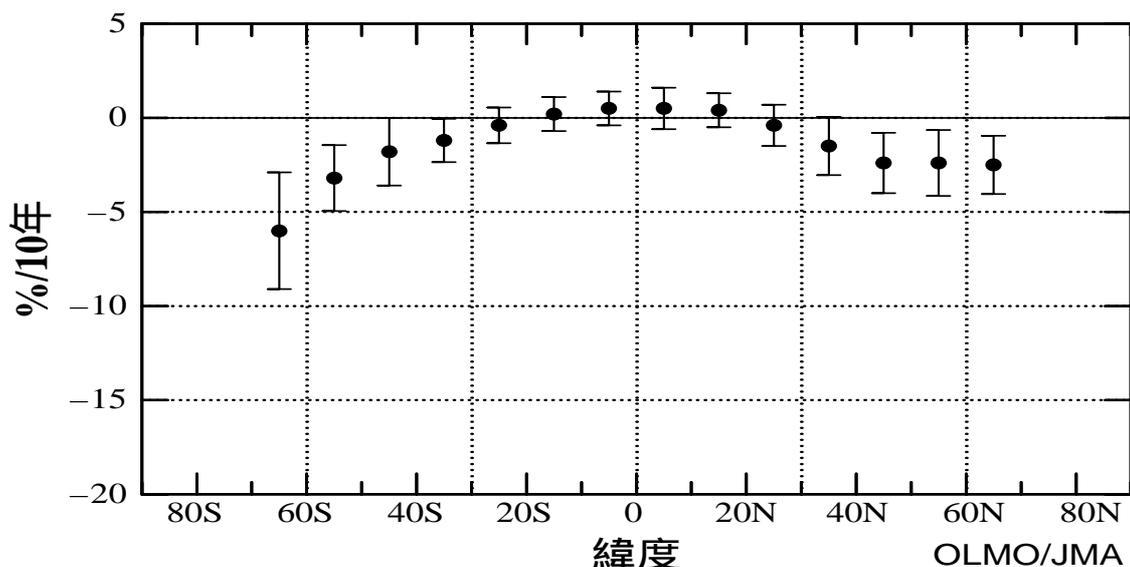


図3 - 2 - 4 : TOMS オゾン全量トレンドの緯度分布

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、季節変化、太陽活動、QBOに依存する変動成分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。

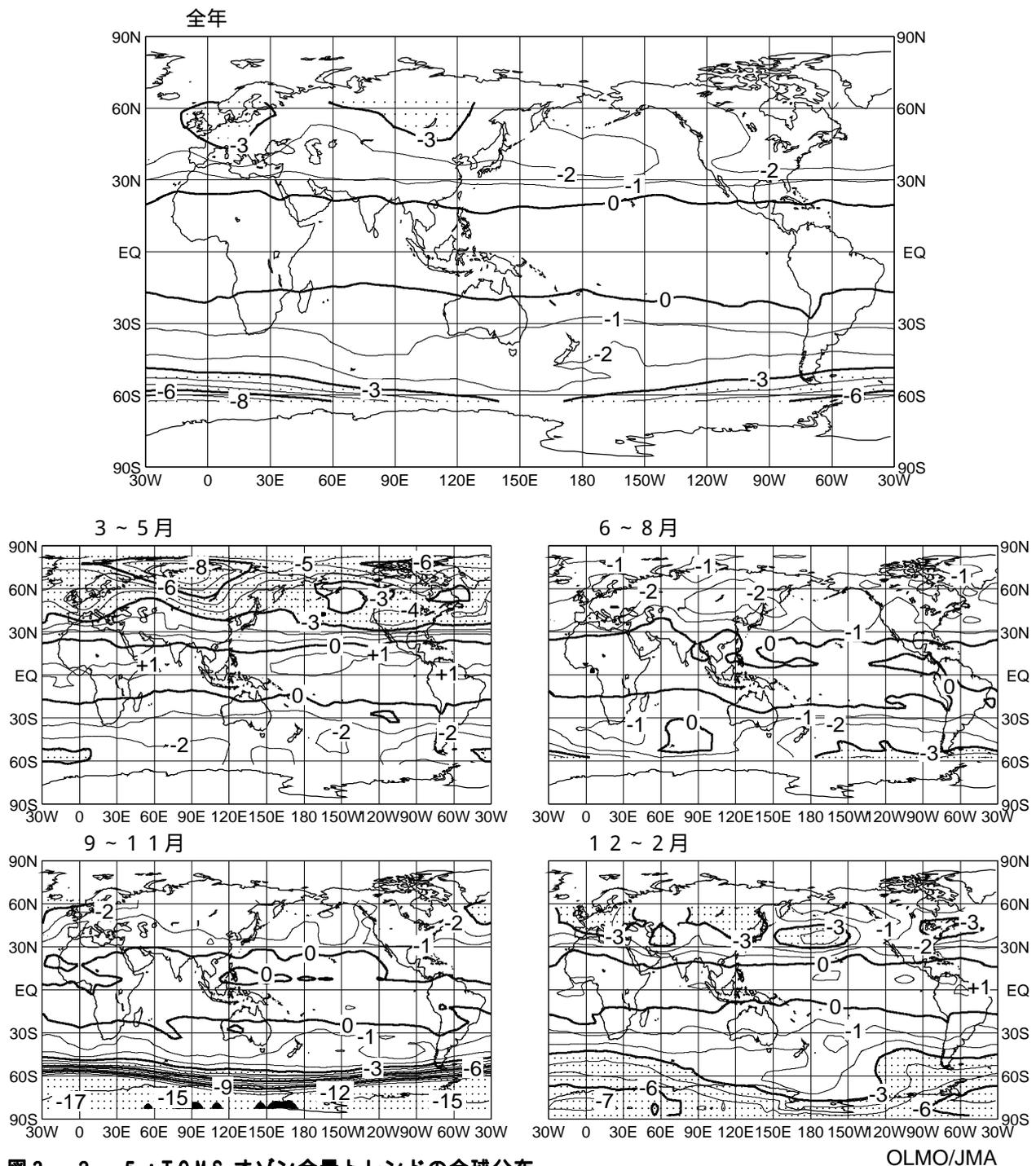


図3 - 2 - 5 : TOMS オゾン全量トレンドの全球分布

OLMO/JMA

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、季節変化、太陽活動、QB0に依存する変動成分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。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。

な減少トレンドを示している。減少率は高緯度ほど大きい。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。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。オゾントレンドの分布は1999年とほぼ同じであるが、1998年までのトレンドと比較して減少率が小さくなっている(気象庁,1999;気象庁,2000)。オゾン全量トレンドの全球分布を季節別に見ると、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化を示す。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。年毎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、1997年春季は大規模であった。2002年春季は、値は小さかったが、偏差は負になった。（図3-2-7）。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11年のうち5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。

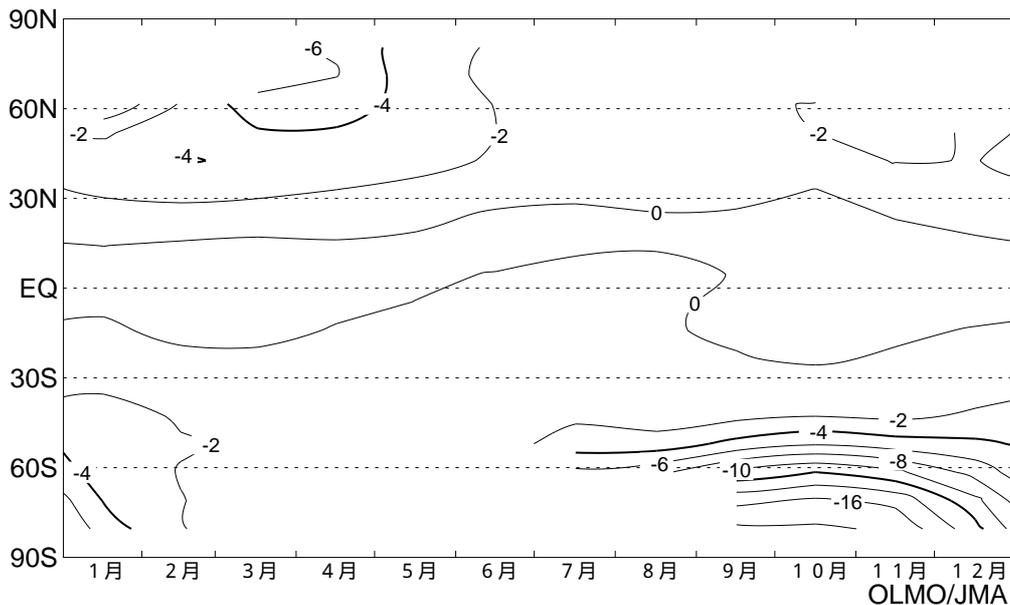


図3-2-6：TOMS オゾン全量トレンドの緯度別季節変化

緯度格子点（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、季節変化、太陽活動、QB0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）の季節変化。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。

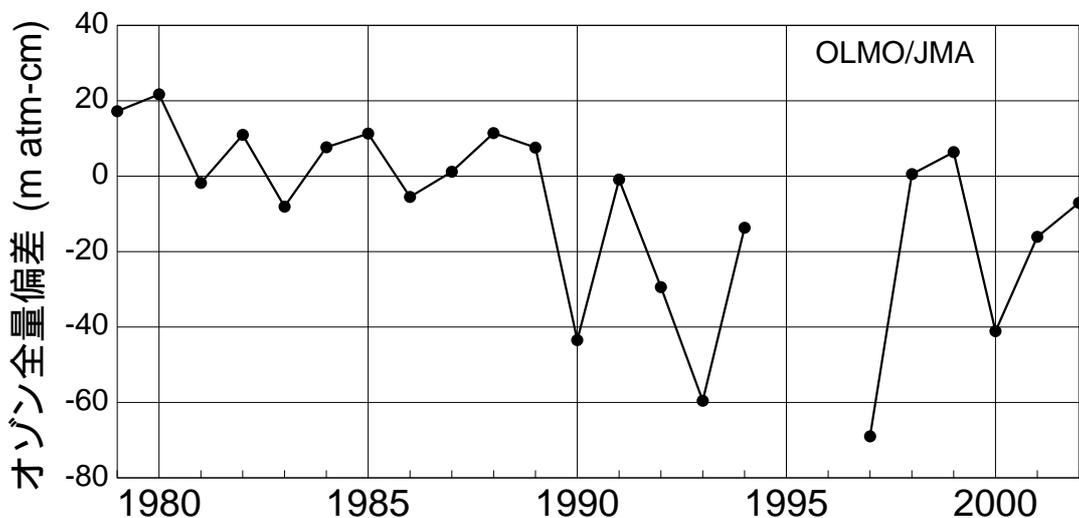


図3-2-7：北半球高緯度の3、4月のオゾン全量偏差の推移

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。

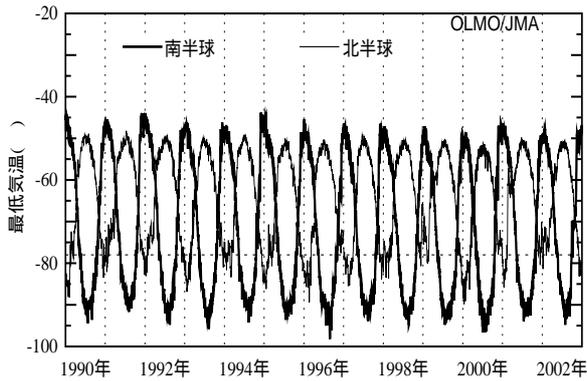
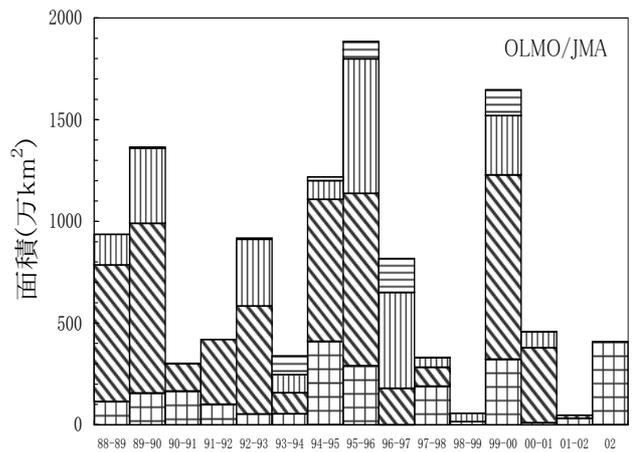


図3 - 2 - 8 : 高緯度域の最低気温の年変化
北緯 60 度以北、南緯 60 度以南の 50hPa 面の日別最低気温。図中の破線は極域成層圏雲 (PSCs) 発生を目安となる - 78 の気温。気象庁全球解析データを基に作成。

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/UNEP、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を目安となる - 78 を大きく下回るが、北半球では短期間下回るだけである。このような気象条件のため、北半球高緯度では通常は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、気温が少し低下することで極域成層圏雲が発生する期間・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。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を目安となる - 78 以下の領域の月平均面積の推移を示している。図3 - 2 - 7 に示すように、TOMS データの得られなかった 1995、1996 年を除くと、1990、1993、1997、2000 年は春季にオゾン減少が顕著だった。これらの年に共通する特徴は、2、3 月の低温域の面積が大きく広がっていたことで、オゾン全量偏差と逆相関の関係にある。2002 年春季はオゾンの減少が比較的少なく、これは、2、3 月の - 78 以下の面積が小さかったことに対応している。

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極域での成層圏の低温をもたらすとともに、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、冬から太陽光が戻ってくる春先にかけて極域成層圏雲の生成に十分な低温域が拡大すると、南極オゾンホール



■ 12月 ■ 1月 ■ 2月 ■ 3月 (年)

図3 - 2 - 9 : 北半球高緯度の低温域の面積の月平均値の年変化

北緯 50 度以北の 50hPa 面における極域成層圏雲出現を目安となる - 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。

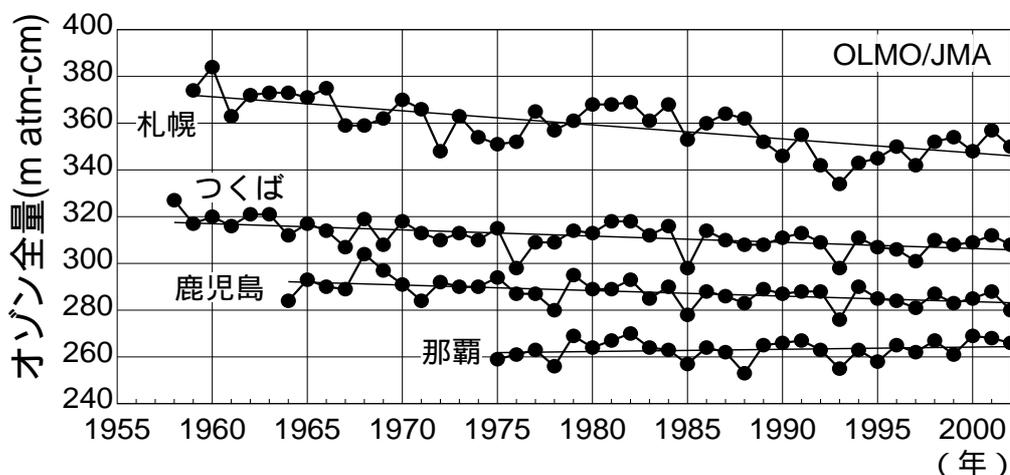


図3 - 3 - 1 : 日本上空のオゾン全量の年平均値の推移

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 2002 年までの年平均値。直線は全期間の長期的な傾向。

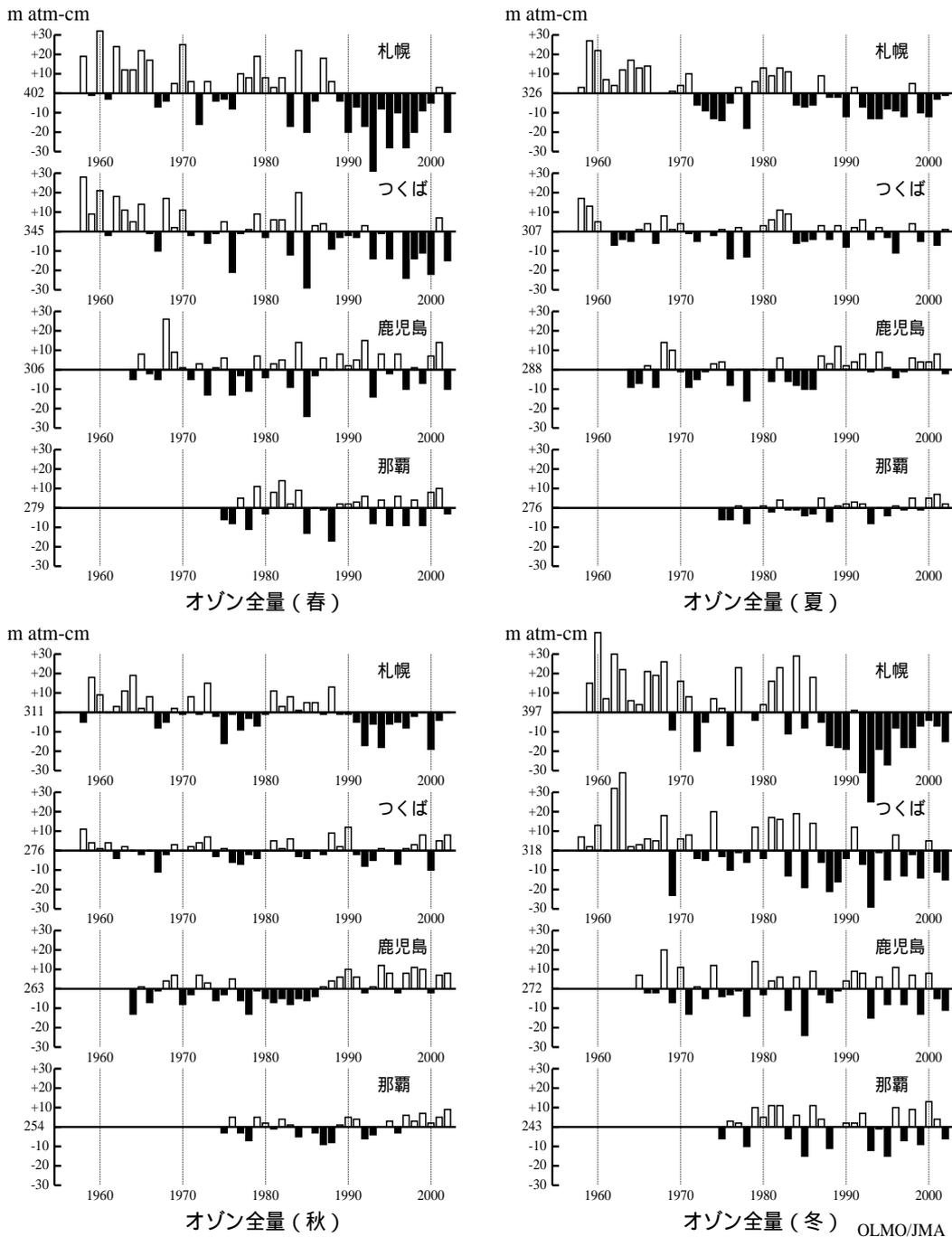


図3 - 3 - 2 : オゾン全量の季節平均値の推移

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。

と同様の化学的な過程によりオゾン減少が促進されるものと考えられる。

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。ただし、図中の直線は、観測開始から2002年までの全期間の実際のオゾン全量の長期的な傾向を示すもので、第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、冬季、春季で札幌、つくば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。