

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に北半球中緯度について、衛星、オゾンゾンデ及び反転観測から求めたオゾントレンドの高度分布を示す。これによれば、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付近では、クロロフルオロカーボン等から光解離した塩素原子によるオゾン破壊が起こっている。一方、高度15km付近では、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、この高度においては大気中のエアロゾル等の粒子表面での不均一反応(異相反応ともいわれる)により活性化されることでオゾンの破壊を引き起こす(WMO, 1999)。

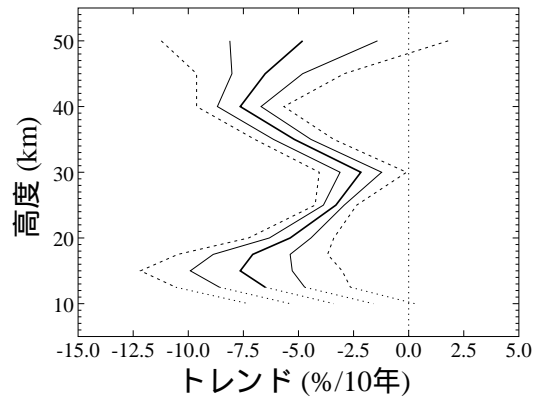


図3 - 2 - 1: オゾンのトレンドの高度分布
1980 ~ 1996年のSAGE 1/11、SBUV、オゾンゾンデ、反転観測データを基に作成した北半球中緯度の高度別オゾンのトレンド(%/10年)。実線がトレンドと68%の信頼限界、破線は95%の信頼限界(WMO, 1998)。

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、2001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、地点毎に季節変化、太陽活動、QBOの影響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(1982 ~ 2001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70度以南)の9 ~ 11月は南極オゾンホール出現に伴って、15%/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全年について求めた。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。

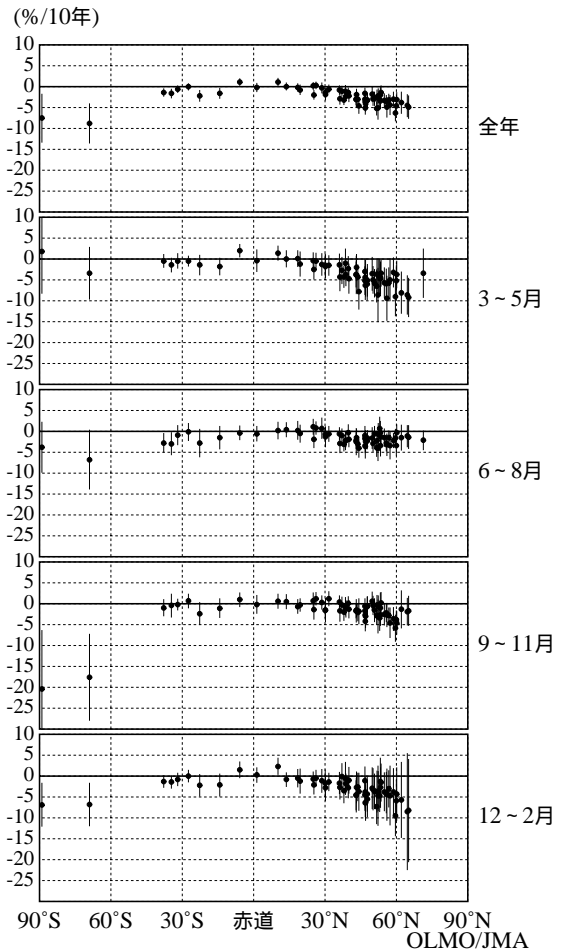


図3 - 2 - 2: 地上観測データによる20年間のオゾン全量トレンドの緯度分布
1982 ~ 2001年の各観測地点(99地点)におけるオゾン全量のトレンド。横軸が緯度、縦軸がトレンド。それぞれの点が各観測地点におけるトレンドを示し、縦棒はそのトレンドの95%信頼限界の範囲。上から順に、全年、3 ~ 5月、6 ~ 8月、9 ~ 11月、12 ~ 2月におけるトレンド(%/10年)。

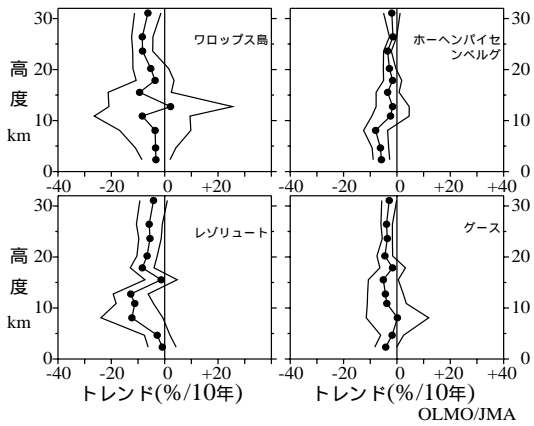


図3 - 2 - 3: 北半球の4地点におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

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(1982～2001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)。左上がワロップス島(米国、北緯37.93度、西経75.48度)、右上がホーヘンバイゼンベルグ(ドイツ、北緯北緯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)、右下がゲース(カナダ、北緯53.32、西経60.30度)。

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。

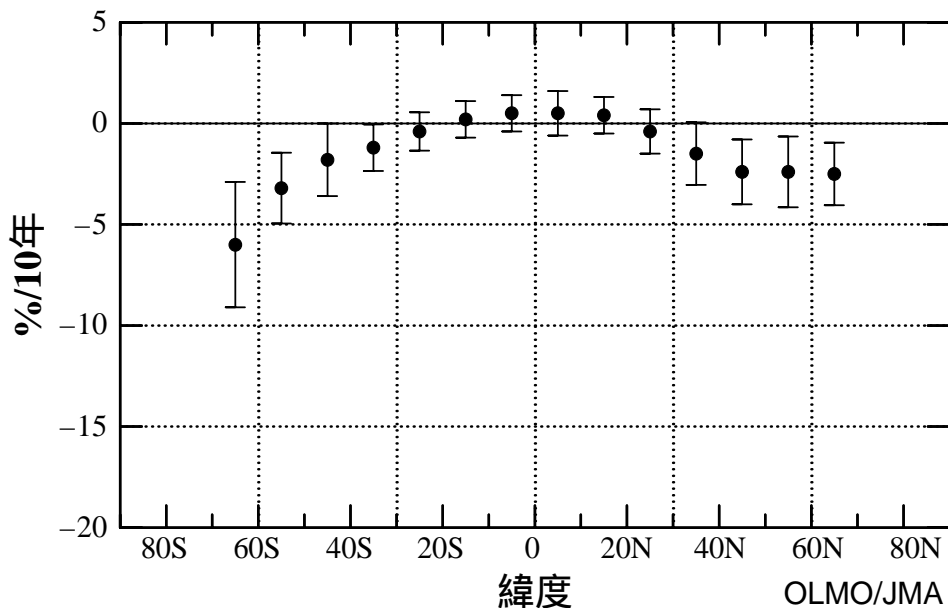


図3 - 2 - 4: TOMS オゾン全量トレンドの緯度分布

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。

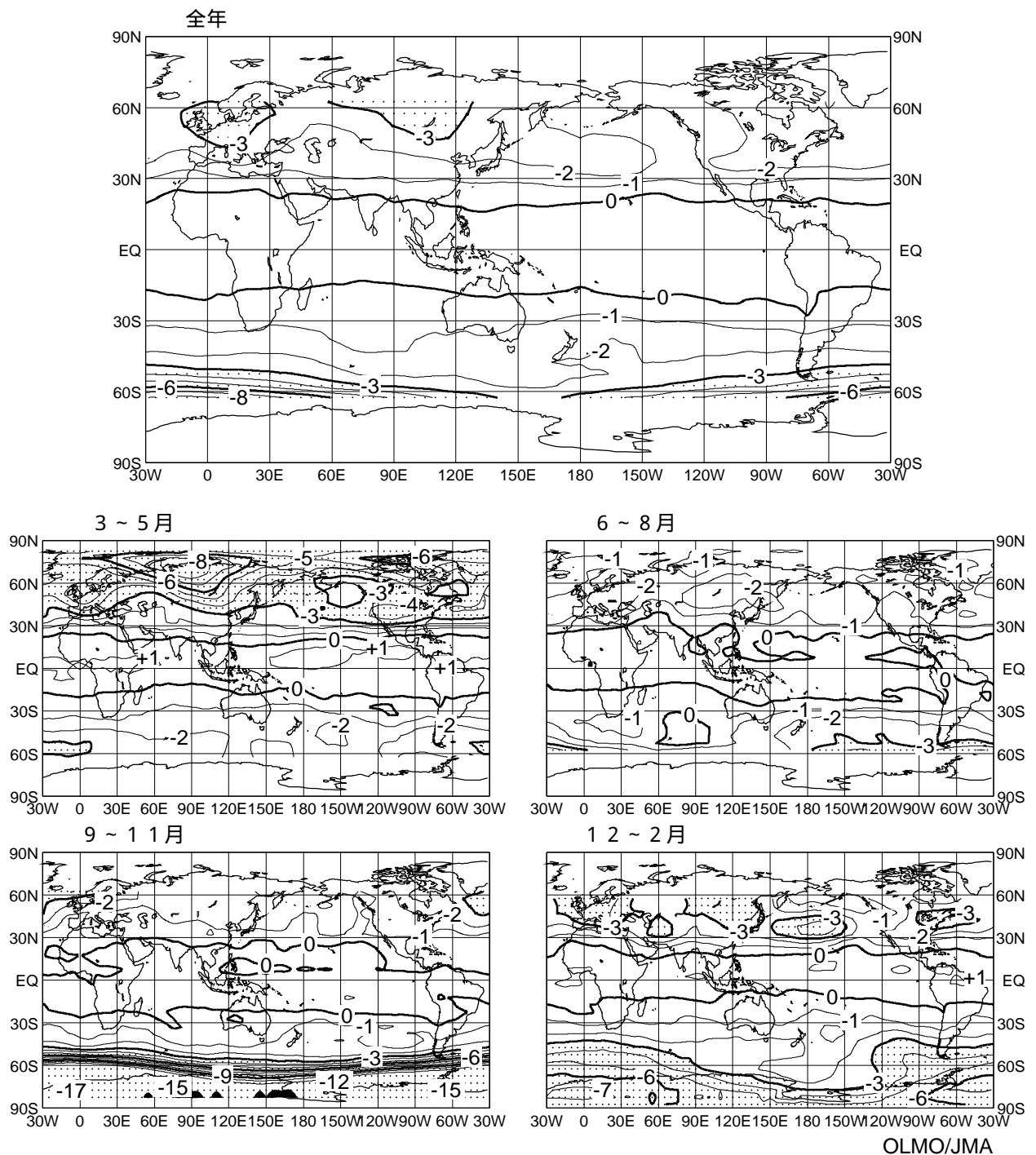


図3 - 2 - 5 : TOMS オゾン全量トレンドの全球分布

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、季節変化、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。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。

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に示すオゾン全量トレンドの緯度別季節変化によると、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。北半球高緯度でも近年、春季に顕著なオゾン減少が現れており、1997年春季は大規模だった。2001年春季は、2000年よりも偏差の値は小さかったものの、オゾン全量の参照値(1979～1992年の平均)よりも10m atm-cm以上少なかった(図3-2-7)。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10年中5回現れており、近年、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。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

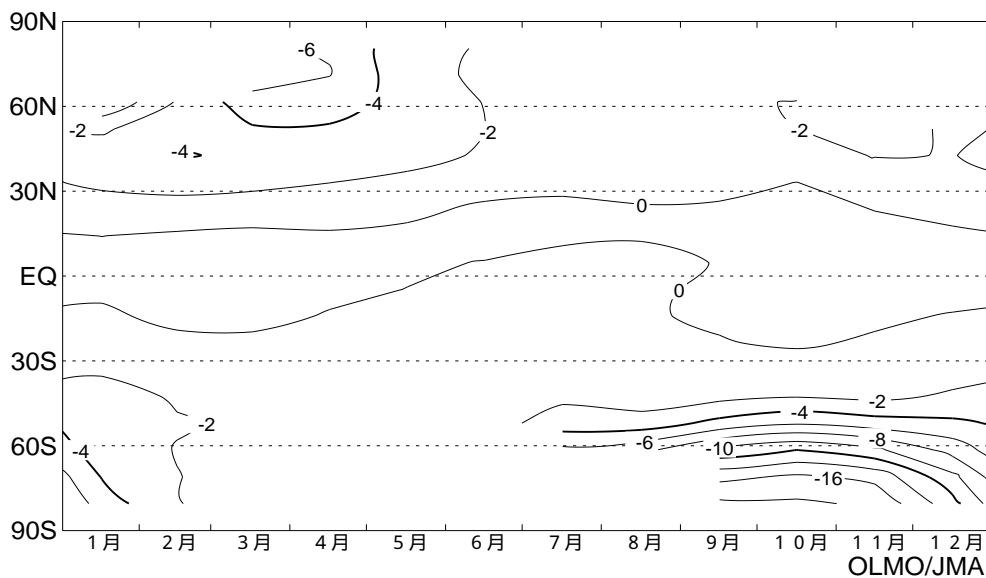


図3-2-6: TOMS オゾン全量トレンドの緯度別季節変化

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、QBOの影響を除去した後、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。

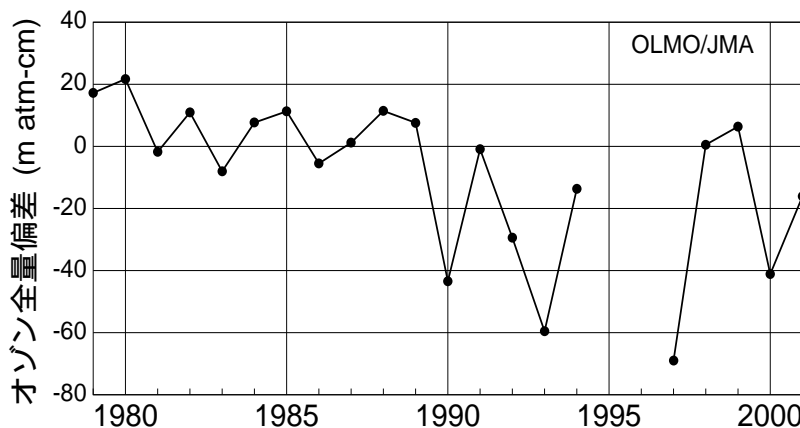


図3-2-7: 北半球高緯度の3、4月のオゾン全量偏差の推移

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。

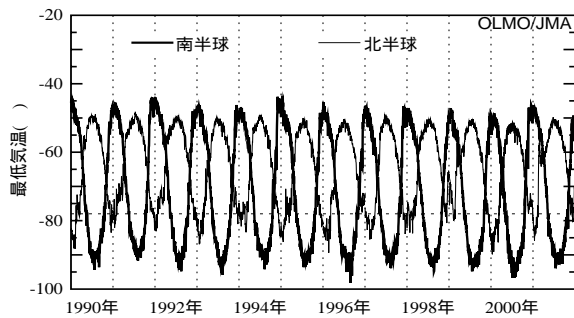


図3 - 2 - 8 : 高緯度域の最低気温の年変化
北緯 60 度以北、南緯 60 度以南の 50hPa 面の日別最低気温。図中の破線は極域成層圏雲 (PSCs) 発生を目安となる - 78 の気温。気象庁全球解析データを基に作成。

の目安となる - 78 を大きく下回るが、北半球の最低気温は冬季の最も気温が低い時期に極域成層圏雲が発生する目安の - 78 をようやく下回る程度である。このような気象条件のため、北半球高緯度では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と考えられる。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。図3 - 2 - 7に示すように、TOMSデータがない1995、1996年を除き、春季にオゾン減少が顕著だった1990、1993、1997、2000年は1月の低温域の面積よりも、2、3月の低温域の面積が大きく広がっていたことと関連(逆相関)している。2001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た。

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り、極域のオゾン減少をもたらす。さらに冬から春先に極域成層圏雲ができるほどの低温域が拡大すると、南極オゾンホールと同様の過程によりオゾン減少が促進される。

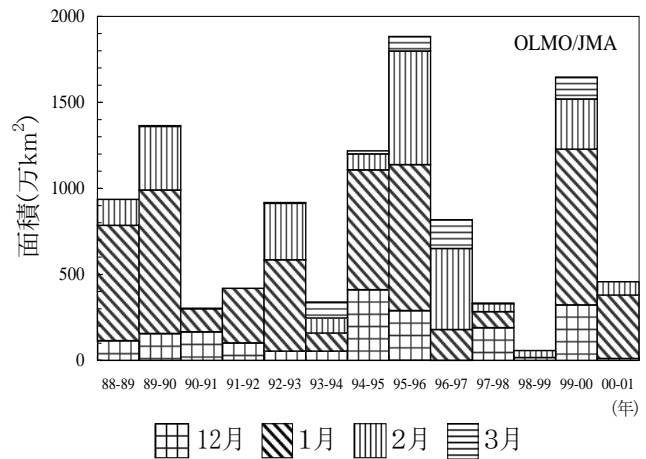


図3 - 2 - 9 : 北半球高緯度の低温域の面積の月平均値の年変化

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

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2001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節で述べた既知の自然変動要因を取り除いて求

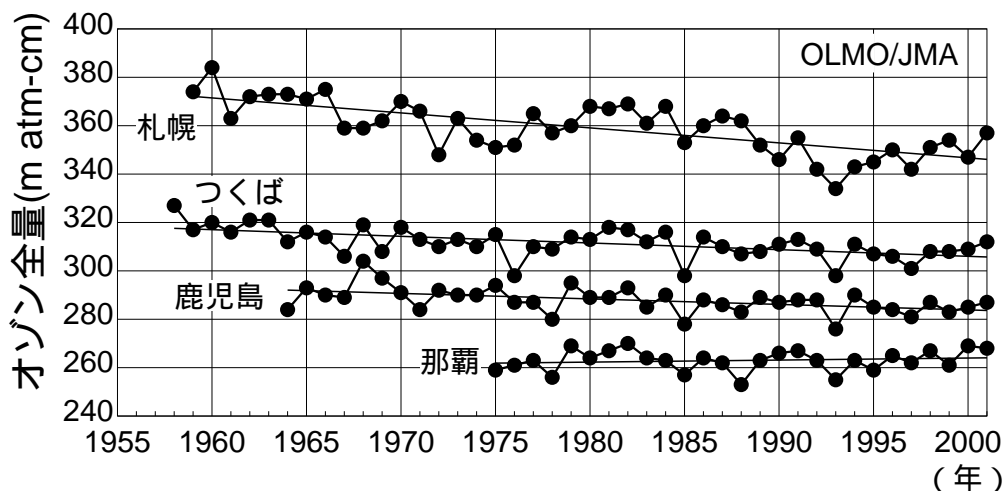


図3 - 3 - 1 : 日本上空のオゾン全量の年平均値の推移

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2001年までの年平均値。直線は全期間の長期的な傾向。

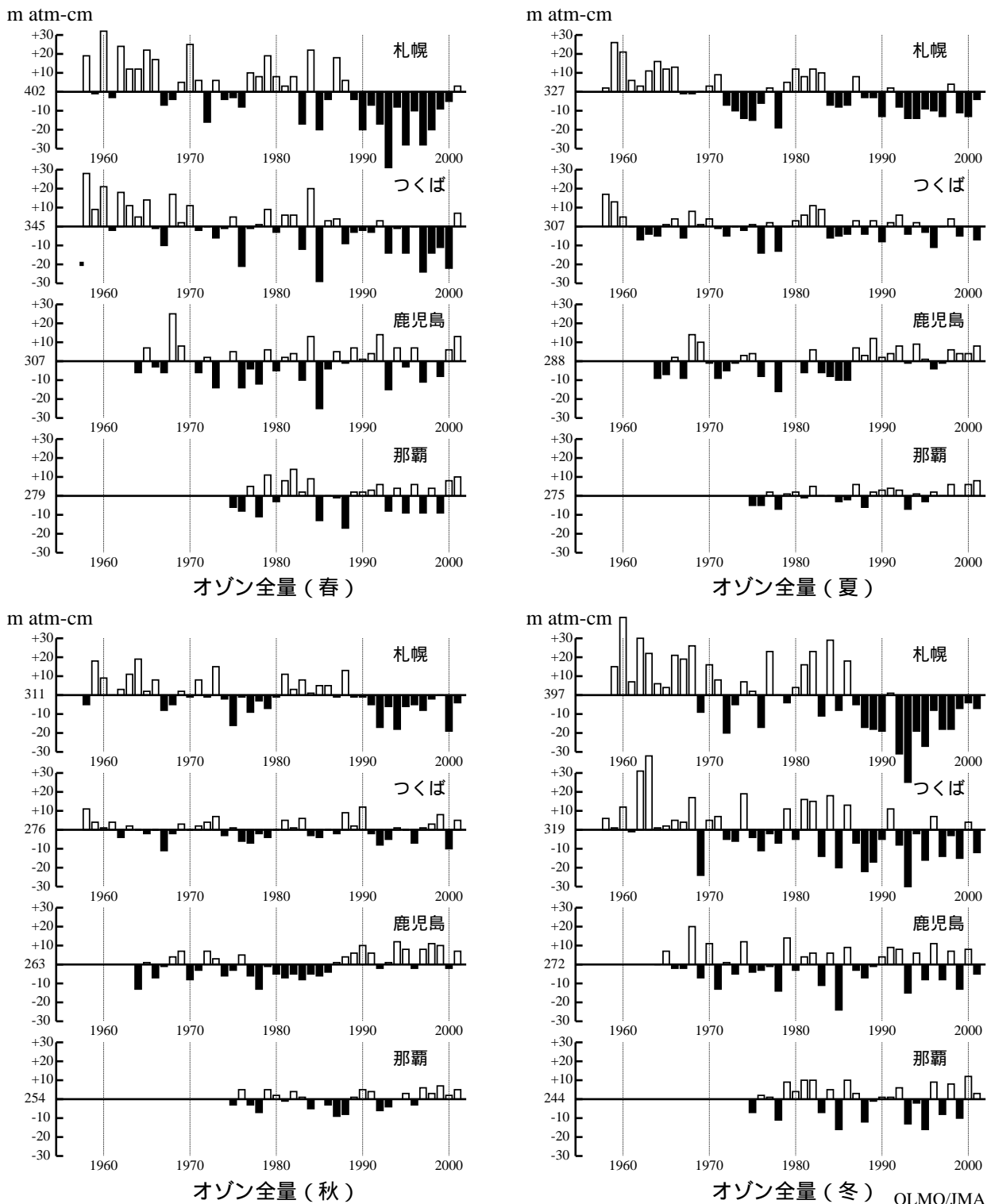


図3 - 3 - 2 : オゾン全量の季節平均値の推移

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。

めるトレンドとは異なる。

図3 - 3 - 2はオゾン全量の季節平均値の経年変化を示す。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、夏季、秋季でも近年、オゾン全量の減少傾向が見られる。

表3 - 3 - 1は日本国内4地点のオゾン全量の全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ある。95%信頼限界を括弧内に記した。下線は統計的に有意な変化傾向を表す。図3 - 3 - 3は、表3 - 3 - 1を図示したもので、印はトレンドが統計的に有意であることを示す。最近20年間で有意な減少トレンドを示しているのは、札幌の全年($-2.6 \pm 1.6\%/10$ 年)、夏季($-2.1 \pm 2.0\%/10$ 年)、秋季

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、QBO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(1972 ~ 2001年、但し那覇は1974 ~ 2001年)、下段は20年間(1982 ~ 2001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
全年	1972 ~ 2001	-1.4(-2.3 ~ -0.5)	-0.6(-1.2 ~ 0.1)	-0.7(-1.4 ~ -0.1)	0.2(-0.3 ~ 0.8)
	1982 ~ 2001	<u>-2.6(-4.3 ~ -1.0)</u>	-0.9(-2.0 ~ 0.2)	-0.5(-1.7 ~ 0.7)	0.5(-0.4 ~ 1.3)
春 (3 ~ 5月)	1972 ~ 2001	<u>-2.0(-3.9 ~ -0.1)</u>	-0.6(-2.1 ~ 0.9)	-0.7(-2.2 ~ 0.9)	0.0(-1.1 ~ 1.2)
	1982 ~ 2001	-2.6(-6.5 ~ 1.2)	-0.9(-3.5 ~ 1.8)	-1.0(-4.1 ~ 2.1)	-0.1(-1.9 ~ 1.8)
夏 (6 ~ 8月)	1972 ~ 2001	-0.6(-1.8 ~ 0.7)	-0.1(-1.1 ~ 0.9)	-0.5(-1.5 ~ -0.6)	0.6(-0.4 ~ 1.5)
	1982 ~ 2001	<u>-2.1(-4.1 ~ -0.1)</u>	-1.0(-2.6 ~ 0.5)	-0.3(-2.0 ~ 1.4)	0.9(-0.6 ~ 2.3)
秋 (9 ~ 11月)	1972 ~ 2001	-1.0(-2.2 ~ 0.2)	-0.3(-1.1 ~ 0.6)	-0.2(-1.3 ~ 0.9)	0.5(-0.5 ~ 1.6)
	1982 ~ 2001	<u>-2.5(-4.6 ~ -0.4)</u>	-0.7(-2.2 ~ 0.9)	0.6(-1.3 ~ 2.4)	0.9(-0.7 ~ 2.5)
冬 (12 ~ 2月)	1972 ~ 2001	-2.3(-4.6 ~ 0.1)	-1.3(-2.9 ~ 0.2)	<u>-1.6(-3.1 ~ -0.1)</u>	-0.3(-1.5 ~ 0.9)
	1982 ~ 2001	-3.7(-8.2 ~ 0.8)	-1.3(-4.1 ~ 1.5)	-1.4(-4.3 ~ 1.4)	0.1(-2.0 ~ 2.2)

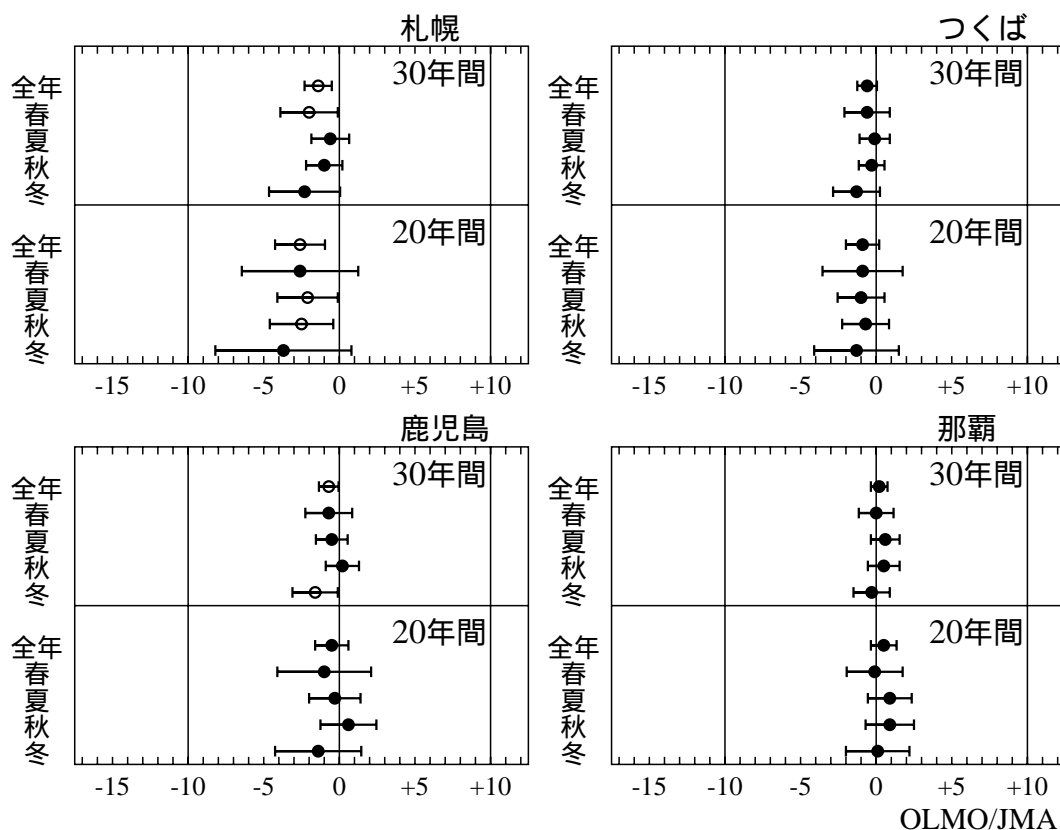


図3 - 3 - 3 : 日本上空のオゾン全量トレンドの緯度別季節変化

印及び 印は最近30年間(1972 ~ 2001年、但し那覇は1974 ~ 2001年)と最近20年間(1982 ~ 2001年)について全年(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。

($-2.5 \pm 2.1\%/10$ 年)である。最近30年間では、札幌の全年($-1.4 \pm 0.9\%/10$ 年)及び春季($-2.0 \pm 1.9\%/10$ 年)、鹿児島全年($-0.7 \pm 0.6\%/10$ 年)及び冬季($-1.6 \pm 1.5\%/10$ 年)で有意な減少トレンドを示している。また、図表には示していないが最近10年間では、統計的に有意なオゾンの減少トレンドはなかった。

図3-3-4に月別のオゾン全量トレンドを示した。札幌の2、5月の減少傾向が顕著に現れている。

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。反転観測につ

いては、札幌、鹿児島、那覇のデータに測器の変更に伴う不連続が検出されている。そのため、今回の報告でもその不連続点以前のデータに補正を行った。解析例として図3-3-5につくばの反転観測第7層(高度約33~38km)の結果を示す。上図は1970~2001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(1982~2001)に直線回帰を適用して求めたトレンドである。また、図3-3-6は図3-3-5と同様にオゾンゾンデ観測による70hPa(約17km)と700hPa(約3km)

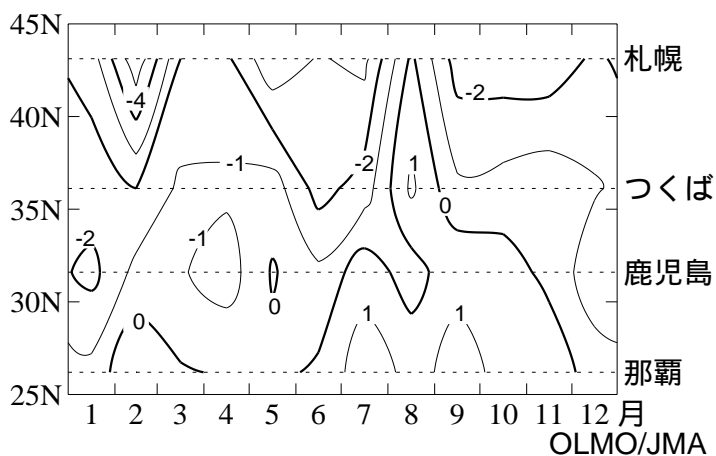


図3-3-4: 日本上空のオゾン全量トレンドの緯度別季節変化
最近20年間(1982~2001年)のオゾン全量の月別トレンド(%/10年)

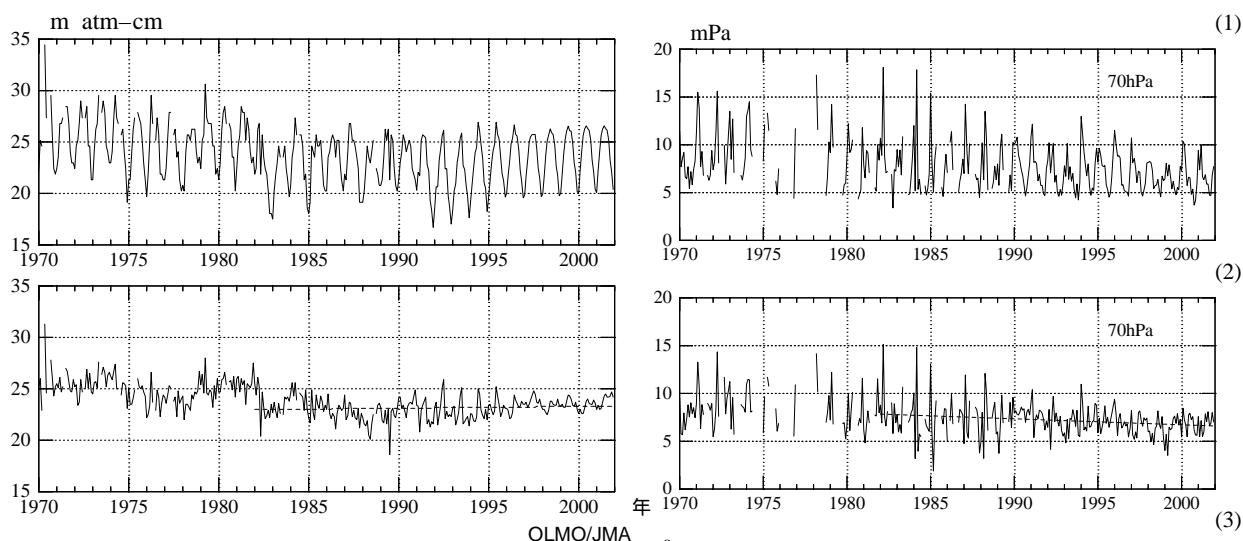
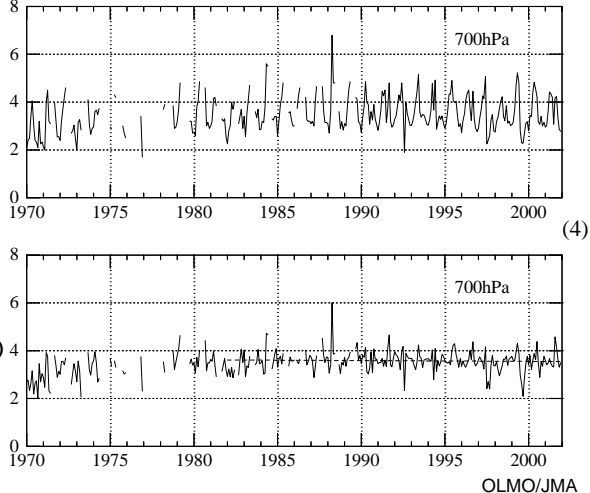


図3-3-5: 反転観測データによるトレンド解析例(上)
上図はつくばの反転観測第7層(約33~38km)の1970年からの月平均層別オゾン量(m atm-cm)。下図は上図データから、原因が既知の自然変動(季節変化、太陽活動、QBO、大気混濁度の影響)を除去した結果とその1982~2001年の20年間に直線回帰を適用して求めたトレンド(破線)

図3-3-6: オゾンゾンデデータによるトレンド解析例(右)

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年からの月平均値(mPa)、(2)と(4)はそれぞれ(1)と(2)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1982~2001年の20年間に直線回帰を適用して求めたトレンド。



について解析結果を示したものである。

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たものである。これによると最近20年間のオゾン量は、オゾンゾンデの観測開始が遅いため図中表示していない那覇を除いて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、中・上部成層圏では札幌、鹿児島、那覇で有意な減少トレンドが現れている。対流圏では鹿児島でオゾンの増加傾向が現れており、特に高度8km付近で有意なオゾンの増加トレンドが見られる。

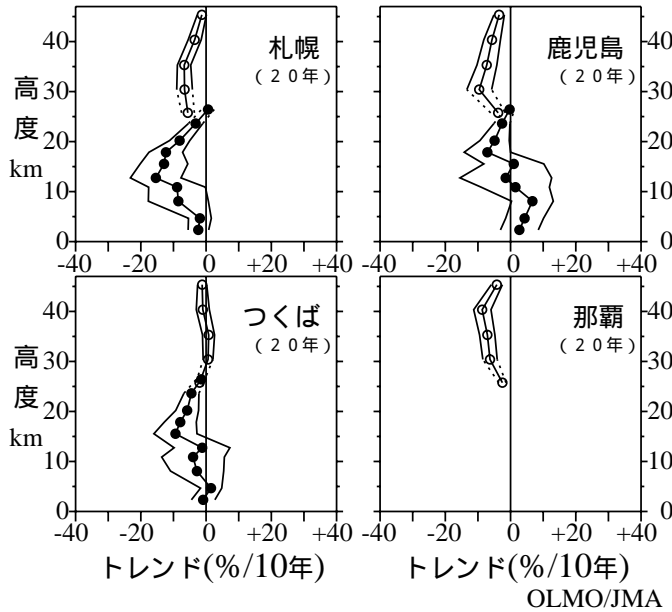


図3-3-7: オゾントレンドの高度分布
オゾンゾンデ観測と反転観測による月平均オゾン分圧と月平均層別オゾン量を基に評価した高度別オゾントレンド(%/10年)。最近20年間(1982~2001年)に対するトレンドの高度分布(印:オゾンゾンデ観測データによる。○印:反転観測データによる)と自己回帰を考慮した95%信頼限界(細い折線)。なお那覇のオゾンゾンデ観測によるトレンドは観測期間が短いため示していない。

3-4 南極域上空のオゾンホール長期変化

図3-4-1は昭和基地におけるドブソン分光計による月平均オゾン全量について、1966~2001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当たる9~11月は、年毎にばらつきがあるものの減少傾向が顕著に見られる。12月及び1~3月も減少傾向が見られる。昭和基地のオゾン全量データに第3-1節のトレンド解析の手法を適用すると、最近20年間のオゾン全量は全年で $-7.9 \pm 4.6\%/10$ 年、9~11月で $-15.9 \pm 11.2\%/10$ 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1980年頃から減少が顕著に現れている。150hPaで1992年頃に極小値を示しているのは、ピナトゥボ火山噴火(1991年6月)による成層圏エアロゾルの影響と考えられる。100、70、50hPaでは1992~1995年頃から、極めて低いオゾン分圧が続いている。30hPaでも1995年以降継続して低いオゾン分圧を示しているが、2000年は1992年以降で最も高い分圧を示した。これは、2000年のオゾンホールが10月に入って急速に縮小し、周囲からのオゾンの多い空気塊の流入により、オゾン分圧が高い値を示したためである。2001年10月は2000年よりも極渦が安定し、オゾンホールは大規模な状態で推移したため、各高度とも2000年より低い分圧となった。また、表紙の図は、昭和基地におけるオゾンゾンデ観測から求めた9~11月及び3ヶ月平均の高度12~20kmにおけるオゾン量の推移を示したものである。この高度のオゾン量は、オゾンホールの時期にオゾン層破壊がきわめて大きい(2-3節参照)ため、オゾンホールの変化傾向の良い指標となる。これによると、南極域では観測開始以降、この高度帯で大きなオゾン層破壊が続いていることを示しており、今後とも注意深い観測が必要である。

図3-4-3はオゾンゾンデ観測による最近20年間における高度別のオゾン分圧のトレンドの高度分布を示す。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月別変化傾向の高度分布を示す。オ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、6mPa/10年を超える減少を示して