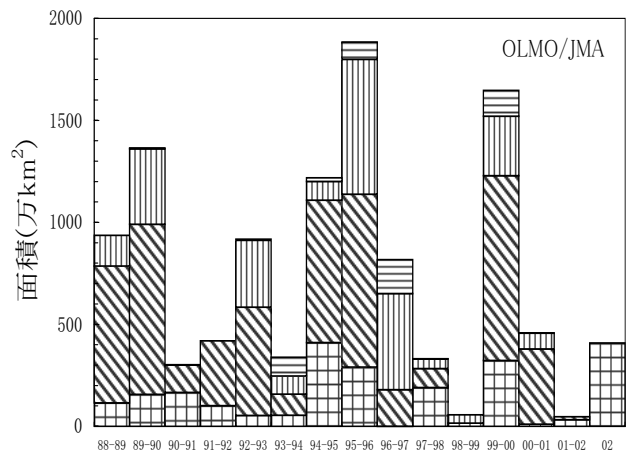


図3 - 2 - 8 : 高緯度域の最低気温の年変化
北緯60度以北、南緯60度以南の50hPa面の日別最低気温。図中の破線は極域成層圏雲(PSCs)発生を目安となる-78の気温。気象庁全球解析データを基に作成。

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同時に、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。

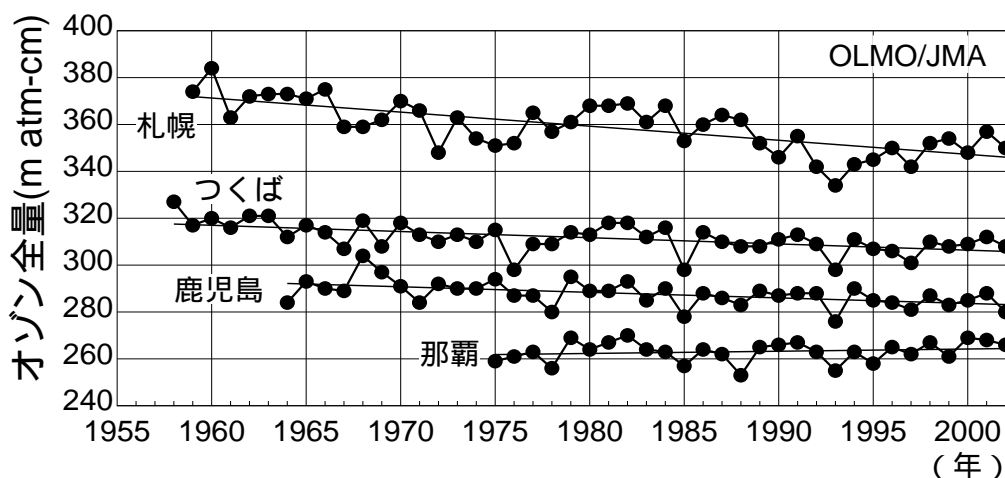


図3 - 3 - 1 : 日本上空のオゾン全量の年平均値の推移

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。

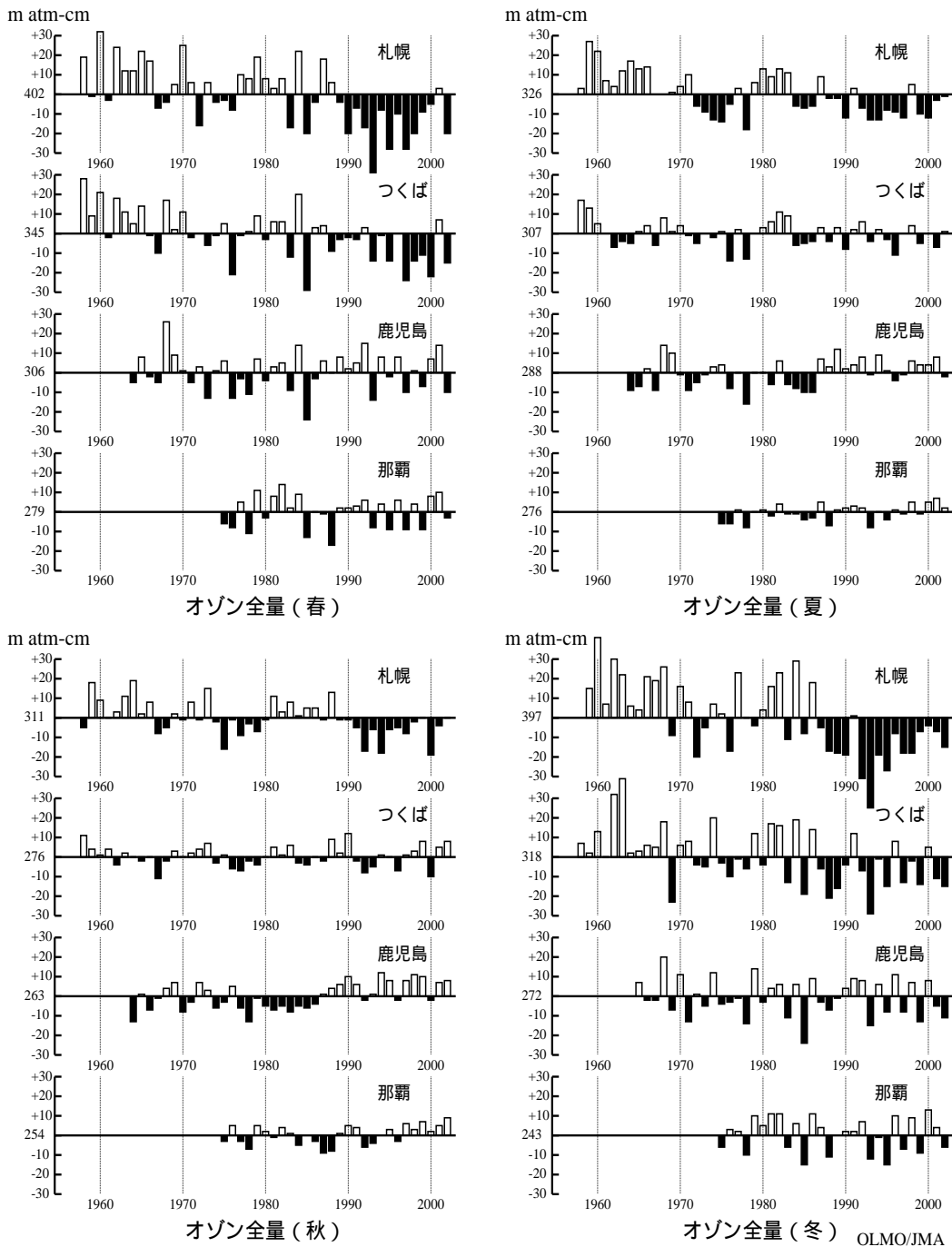


図3 - 3 - 2 : オゾン全量の季節平均値の推移

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。

		札幌	つくば	鹿児島	那覇
全年	1973~2002	-1.6(-2.4~-0.8)	-0.6(-1.2~0.0)	-0.8(-1.4~-0.2)	0.2(-0.2~0.7)
	1983~2002	-2.0(-3.4~-0.6)	-0.5(-1.6~0.6)	-0.2(-1.3~0.8)	0.9(0.1~1.7)
春 (3~5月)	1973~2002	-2.4(-4.1~-0.8)	-0.7(-2.2~0.7)	-0.7(-2.0~0.6)	0.0(-1.0~1.1)
	1983~2002	-2.3(-5.5~0.9)	-0.6(-3.3~2.0)	-0.5(-3.0~2.0)	0.6(-1.2~2.4)
夏 (6~8月)	1973~2002	-0.6(-1.8~0.7)	-0.2(-1.2~0.8)	-0.6(-1.7~0.4)	0.5(-0.4~1.4)
	1983~2002	-1.1(-3.0~0.7)	-0.3(-1.9~1.3)	0.5(-1.1~2.0)	1.1(-0.3~2.5)
秋 (9~11月)	1973~2002	-1.0(-2.1~0.2)	0.0(-0.9~0.8)	-0.1(-1.1~1.0)	0.6(-0.3~1.6)
	1983~2002	-2.2(-4.2~-0.2)	-0.3(-1.9~1.4)	0.6(-1.3~2.5)	1.5(0.1~2.9)
冬 (12~2月)	1973~2002	-2.6(-4.5~-0.6)	-1.5(-2.9~-0.1)	-1.8(-3.1~-0.5)	-0.2(-1.3~0.9)
	1983~2002	-2.7(-6.2~0.9)	-1.0(-3.6~1.6)	-1.5(-3.8~0.8)	0.3(-1.6~2.1)

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に依存する変動成分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(1973~2002年、但し那覇は1974~2002年)、下段は20年間(1983~2002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。

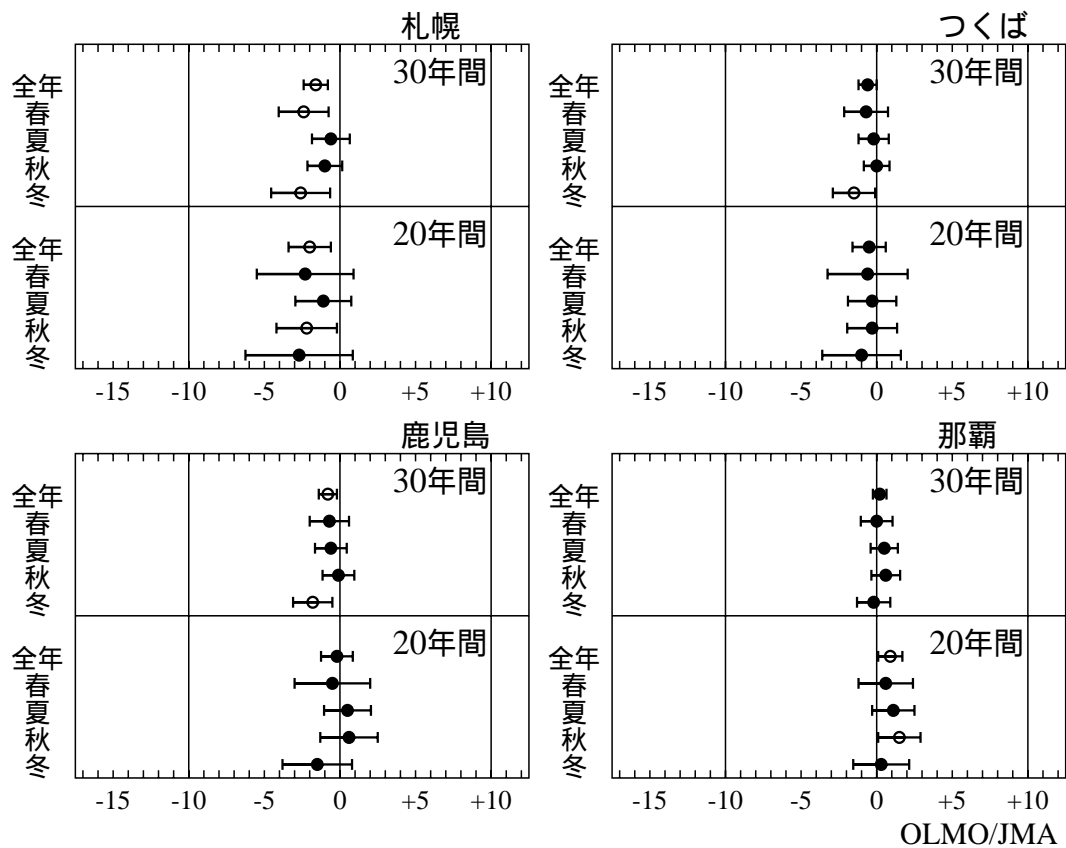


図3 - 3 - 3 : 日本上空のオゾン全量トレンドの緯度別季節変化

印及び 印は最近30年間(1973~2002年、但し那覇は1974~2002年)と最近20年間(1983~2002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。

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であることを表す。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(-2.0 ± 1.4%/10年)と秋季(-2.2 ± 2.0%/10年)である。一方、那覇の全年(0.9 ± 0.8%/10年)、秋季(1.5 ± 1.4%/10年)では有意な増加トレンドを示している。最近30年間では、札幌の全年(-1.6 ± 0.8%/10年)、春季(-2.4 ± 1.7%/10年)及び冬季(-2.6 ± 2.0%/10年)、つくばの冬季(-1.5 ± 1.4%/10年)、鹿児島市の全年(-0.8 ± 0.6%/10年)及び冬季(-1.8 ± 1.3%/10年)で有意な減少トレンドを示している。

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1970~2002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(1983~2002)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)について解析結果を示したものである。

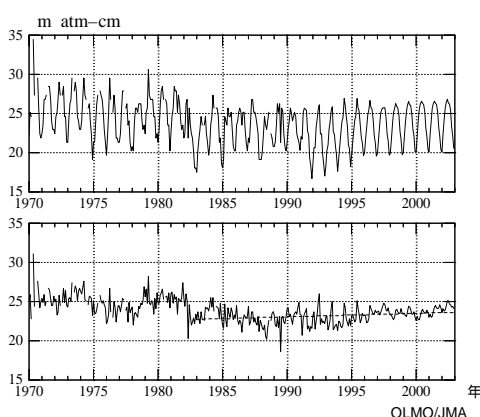


図3-3-5：反転観測データによるトレンド解析例

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、既知の要因に依存する変動成分(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1983~2002年の20年間に直線回帰を適用して求めたトレンド(破線)。

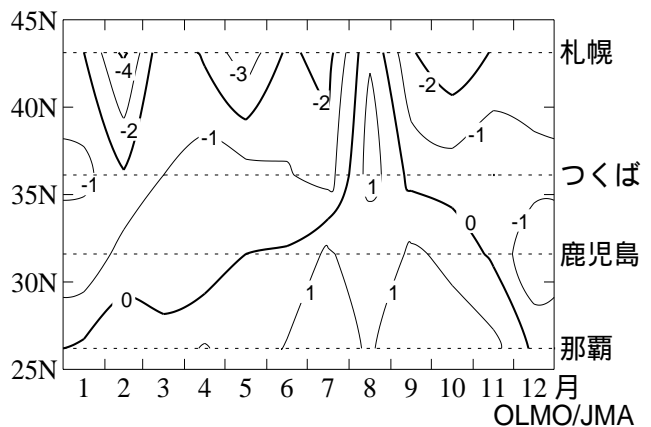


図3-3-4：日本上空のオゾン全量トレンドの緯度別季節変化

最近20年間(1983~2002年)のオゾン全量の月別トレンド(%/10年)

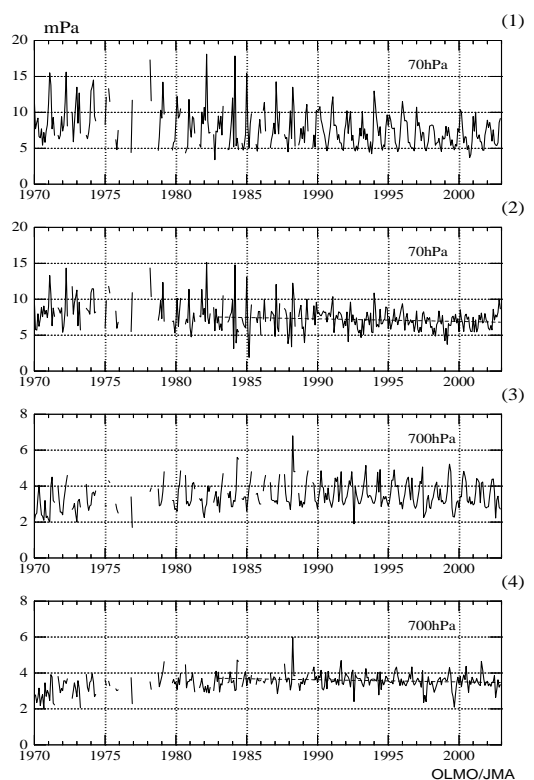


図3-3-6：オゾンゾンデデータによるトレンド解析例

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年からの月平均値(mPa)、(2)と(4)はそれぞれ(1)と(2)から既知の要因に依存する変動成分を除去した結果で、破線はその1983~2002年の20年間に直線回帰を適用して求めたトレンド。

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。オゾンゾンデの観測開始が遅いため図中に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トレンドが現れている。

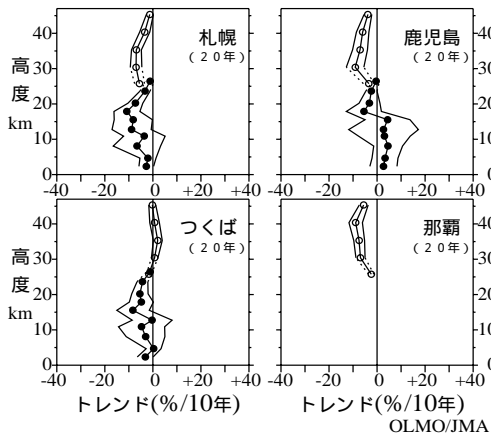


図3 - 3 - 7 : オゾントレンドの高度分布
 オゾンゾンデ観測と反転観測による月平均オゾン分圧と月平均層別オゾン量を基に評価した高度別オゾントレンド(%/10年)。最近20年間(1983～2002年)に対するトレンドの高度分布(印:オゾンゾンデ観測データによる。印:反転観測データによる)と自己回帰を考慮した95%信頼限界(細い折線)。なお那覇のオゾンゾンデ観測によるトレンドは観測期間が短いため示していない。

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計による月平均オゾン全量について、1966～2002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9～12月は、年毎にばらつきはあるものの長期的には顕著な減少傾向が見られる。しかしながら2002年の同期間の月平均オゾン全量は急激に多くなっており、特に10月、11月はオゾンホールが出現し始めたときとされる1980年代前半あるいはそれ以前の値と同程度である。この原因として、第2 - 3章で述べているように、過去20年間見られなかったような大規模な昇温が9月に起こり、極渦が2つに分かれ、急速にオゾンホールが縮小、消滅したことが挙げられる。一方、オゾンホールが解消した後の時期に当たる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年間の変化傾向は全年で $-7.5 \pm 5.2\%/10$ 年、9～11月で $-12.2 \pm 14.2\%/10$ 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。また、特に100、70、50hPaでは1992～1995年頃から、オゾンがほとんど破壊されているような状況が続いていた。2002年については、各気圧面ともに高い分圧を示した。これは、2002年のオゾンホールが9月後半に2つに分かれ急速に縮小し、各高度ともに周囲からのオゾンの多い空気塊の流入が強かったためである。ここで示す高度のオゾン量は、オゾンホールの時期の減少がきわめて大きい(2 - 3 - 2節参照)ため、オゾンホールの変化傾向の良い指標となる。図から明らかなように、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、2002年は気象的な要因でオゾン量が多くなったものの、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年間の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いる。10月以降、オゾン分圧の減少の大きな領域の高度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 /10年以上の低下を示している。また、気温もオゾン同様、11月以降、気温低下のピーク高度が下層へ移っている。このように気温の低下はオゾン減少と対応しており、オゾンの減少に伴っ