

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。

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2003年までの全ての変動要因を含んだオゾン全量の長期的な傾向を示すもので、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、鹿児島へ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、鹿児島へ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)。

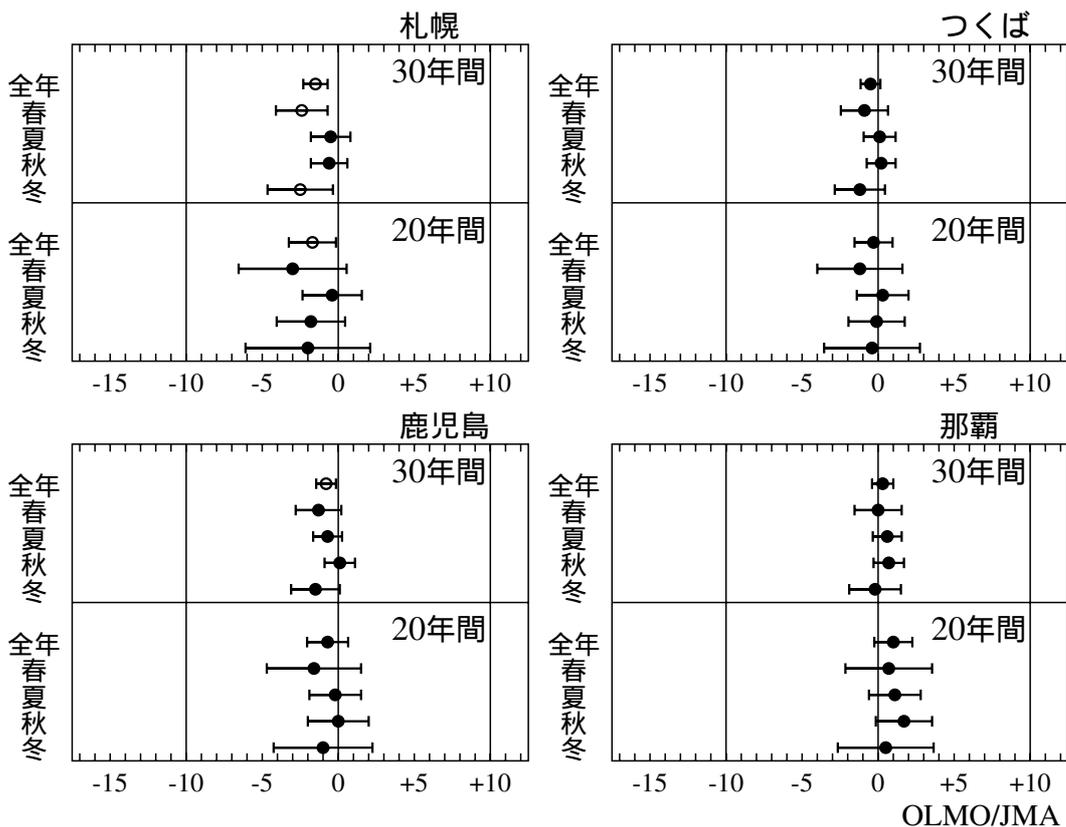


図3-3-3：日本上空のオゾン全量トレンドの緯度別季節変動

印及び 印は最近30年間(1974～2003年)と最近20年間(1984～2003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：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(単位は%/10年)。上段は30年間(1974～2003年)、下段は20年間(1984～2003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	1974～2003	<u>-1.5(-2.3～-0.7)</u>	-0.5(-1.1～0.2)	<u>-0.8(-1.5～-0.2)</u>	0.3(-0.4～1.0)
	1984～2003	<u>-1.7(-3.3～-0.2)</u>	-0.3(-1.6～0.9)	-0.7(-2.0～0.7)	1.0(-0.2～2.3)
春 (3～5月)	1974～2003	<u>-2.4(-4.1～-0.7)</u>	-0.9(-2.4～0.7)	-1.3(-2.8～0.2)	0.0(-1.5～1.6)
	1984～2003	-3.0(-6.5～0.6)	-1.2(-4.0～1.6)	-1.6(-4.7～1.5)	0.7(-2.1～3.6)
夏 (6～8月)	1974～2003	-0.5(-1.8～0.8)	0.1(-1.0～1.1)	-0.7(-1.6～0.3)	0.6(-0.3～1.6)
	1984～2003	-0.4(-2.3～1.6)	0.3(-1.4～2.0)	-0.2(-1.9～1.5)	1.1(-0.6～2.8)
秋 (9～11月)	1974～2003	-0.6(-1.8～0.6)	0.2(-0.8～1.1)	0.1(-0.9～1.1)	0.7(-0.3～1.7)
	1984～2003	-1.8(-4.1～0.4)	-0.1(-1.9～1.8)	0.0(-2.0～2.0)	1.7(-0.1～3.6)
冬 (12～2月)	1974～2003	<u>-2.5(-4.6～-0.3)</u>	-1.2(-2.9～0.4)	-1.5(-3.1～0.1)	-0.2(-1.9～1.5)
	1984～2003	-2.0(-6.1～2.1)	-0.4(-3.5～2.8)	-1.0(-4.2～2.3)	0.5(-2.6～3.7)

図3 - 3 - 3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、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、札幌の全年(-1.5 ± 0.8%/10年)、春季(-2.4 ± 1.7%/10年)及び冬季(-2.5 ± 2.1%/10年)、鹿児島島の全年(-0.8 ± 0.6%/10年)である。最近20年間では、札幌の全年(-1.7 ± 1.6%/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。これによると、月及び地点によりトレンドが異なっていることは明瞭である。特に、札幌の2、5、11月と那覇を除く4月の減少傾向が顕著である。

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。また、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おり、今回の報告でも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1970~2003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

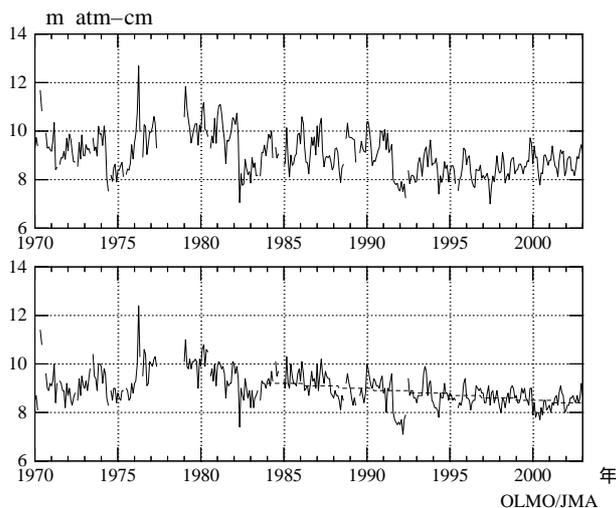


図3 - 3 - 5 : 反転観測データによるトレンド解析例

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1984~2003年の20年間に関する回帰直線(破線)。

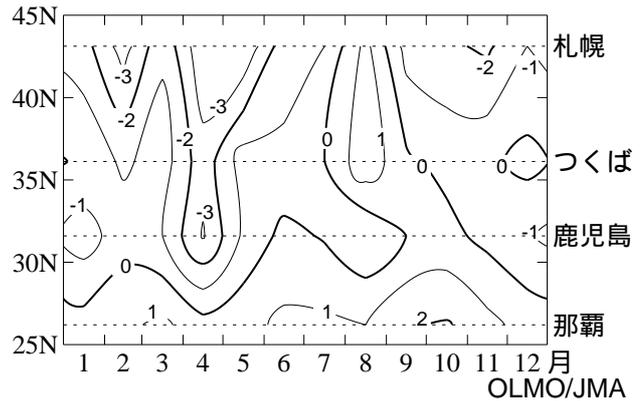


図3 - 3 - 4 : 日本上空のオゾン全量トレンドの緯度別季節変動

最近20年間(1984~2003年)のオゾン全量の月別トレンド(%/10年)。

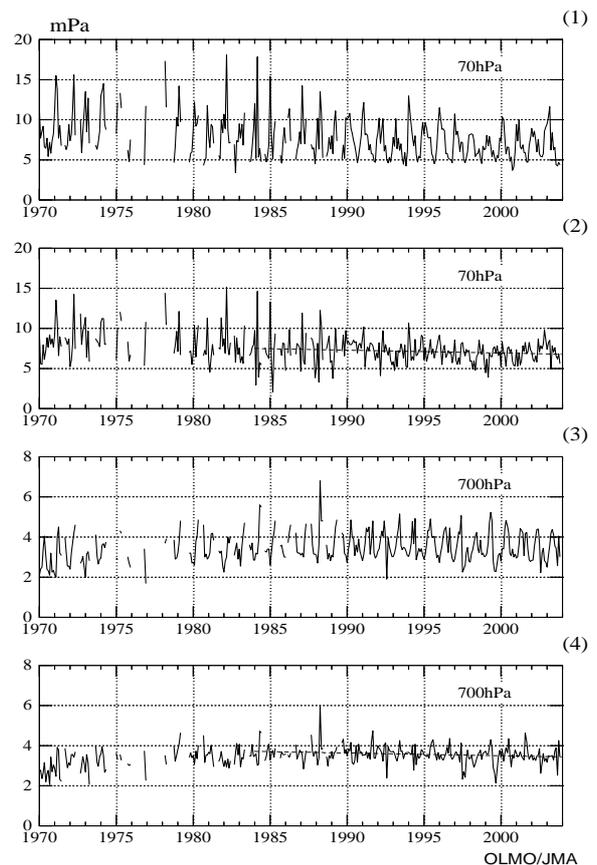


図3 - 3 - 6 : オゾンゾンデデータによるトレンド解析例

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年以降の月平均値(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1984~2003年の20年間に関する回帰直線。

(1984 ~ 2003年)に関する回帰直線で、トレンドは $-5.0 \pm 2.6\%/10$ 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、トレンドは70hPaで $-4.0 \pm 4.4\%/10$ 年、700hPaで $-2.8 \pm 3.2\%/10$ 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たものである。オゾンゾンデの観測開始時期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・上部成層圏では全観測所で有意な減少トレンドが現れている。有意ではないが、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。

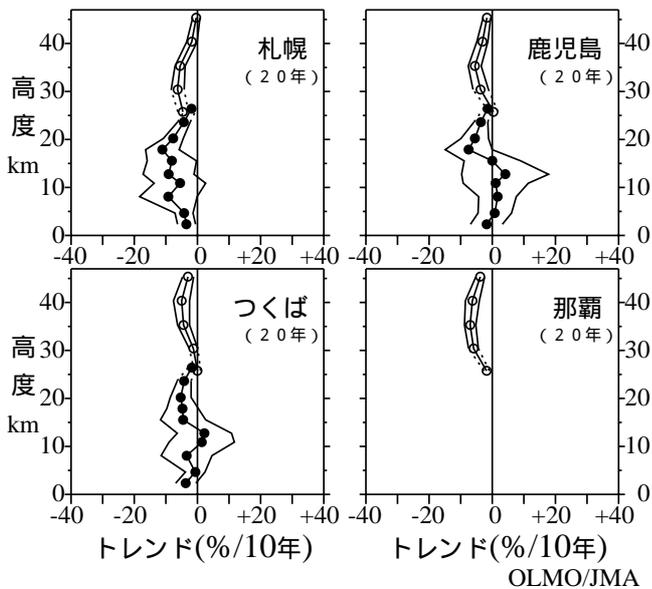


図3 - 3 - 7 : オゾントレンドの高度分布

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(単位は%/10年)。最近20年間(1984 ~ 2003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。○: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 ~ 2003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たが、これは2002年の南極域では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。また、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年以降の変化傾向は全年で $-6.8 \pm 3.9\%/10$ 年、9 ~ 11月で $-13.1 \pm 9.7\%/10$ 年で有意に減少している。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)

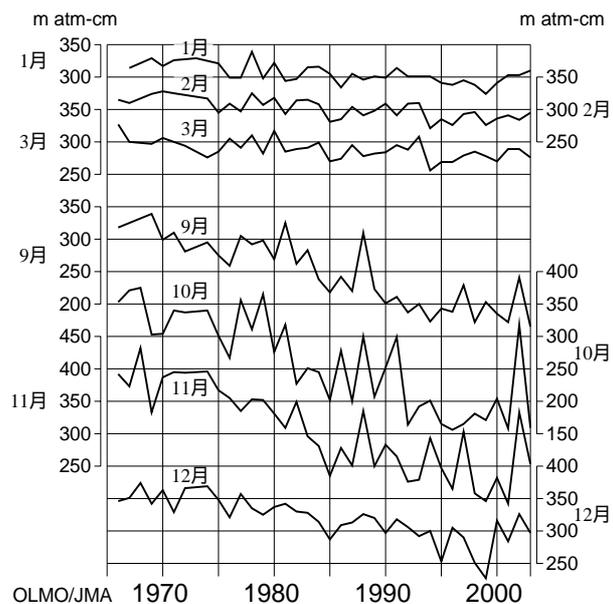


図3 - 4 - 1 : 南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化

のオゾン分圧の経年変化を示す。各高度とも全量同様に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。また、特に100、70、50hPaでは1992～1995年頃から、2002年を除いてほとんどのオゾンが破壊されているような状況が続いている。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によりオゾンが大きく減少する高度であるため、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は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、5mPa/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、オゾンと同様に、気温低下のピーク高度は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に対応しており、オゾンの減少に伴って紫外域日射の吸収による大気への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月については最新の処理方法(Ver.7)によるデータが公表されていないので、古い処理方法(Ver.6)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年には全球の平均値である約300m atm-cm前後であったが、1980年に250m atm-cm以下の領域が現れ、その後、1982年に220m atm-cm、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、1995、1998、1999、2001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年の規模は小さかったものの、オゾンホールは長期的には依然拡大傾向にあり、2003年のオゾンホールは最大面積が過去2位、オゾン欠損量が過去最大となり、縮小する兆しは見られない。

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月をまたいで変動している。2003年の消滅日は大規模なオゾンホールの発生年の中では平均的であった。

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のままであり、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,2002)。

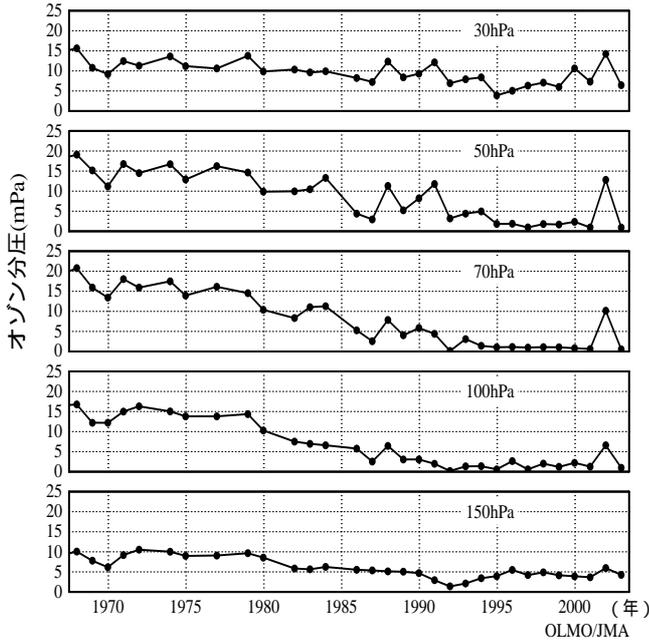


図3 - 4 - 2 : 南極昭和基地における150、100、70、50及び30hPaの10月の月平均オゾン分圧の経年変化

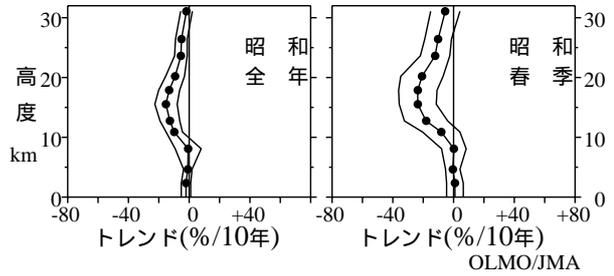


図3 - 4 - 3 : 南極昭和基地におけるオゾン分圧のトレンドの高度分布

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、オゾンホールが観測された以降(1980 ~ 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)。左が全年、右が春季(9 ~ 11月)。

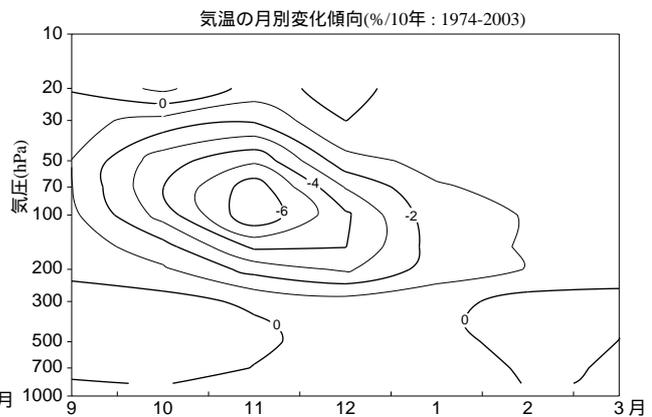
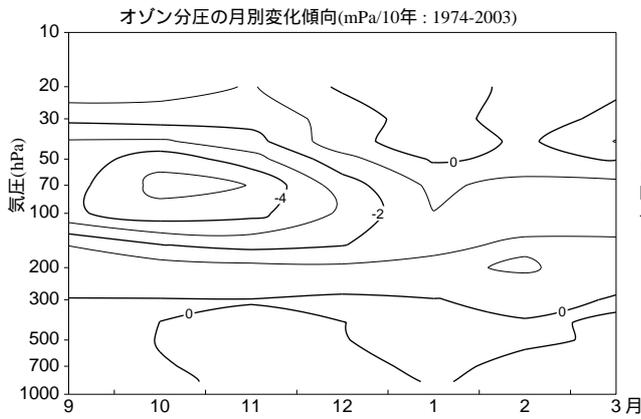


図3 - 4 - 4 : オゾン及び気温の高度分布の月別変化傾向

左図は最近30年間(1974 ~ 2003年)のオゾン分圧の月別変化傾向(単位はmPa/10年)。右図は同期間の気温の月別変化傾向(単位は%/10年)。

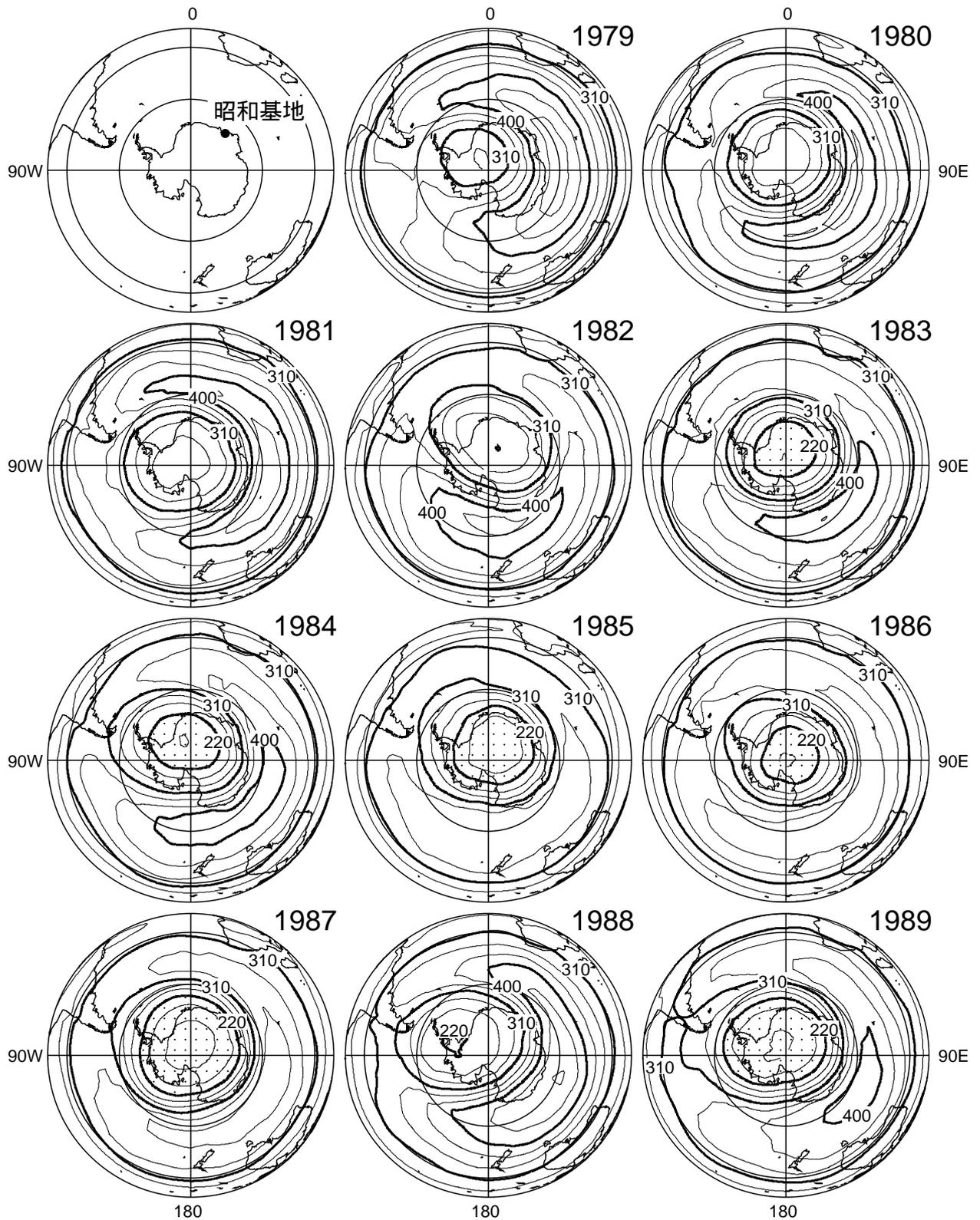


図3 - 4 - 5 (1) : 10月の月平均オゾン全量の南半球分布図

等値線は30m atm-cm 毎。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。

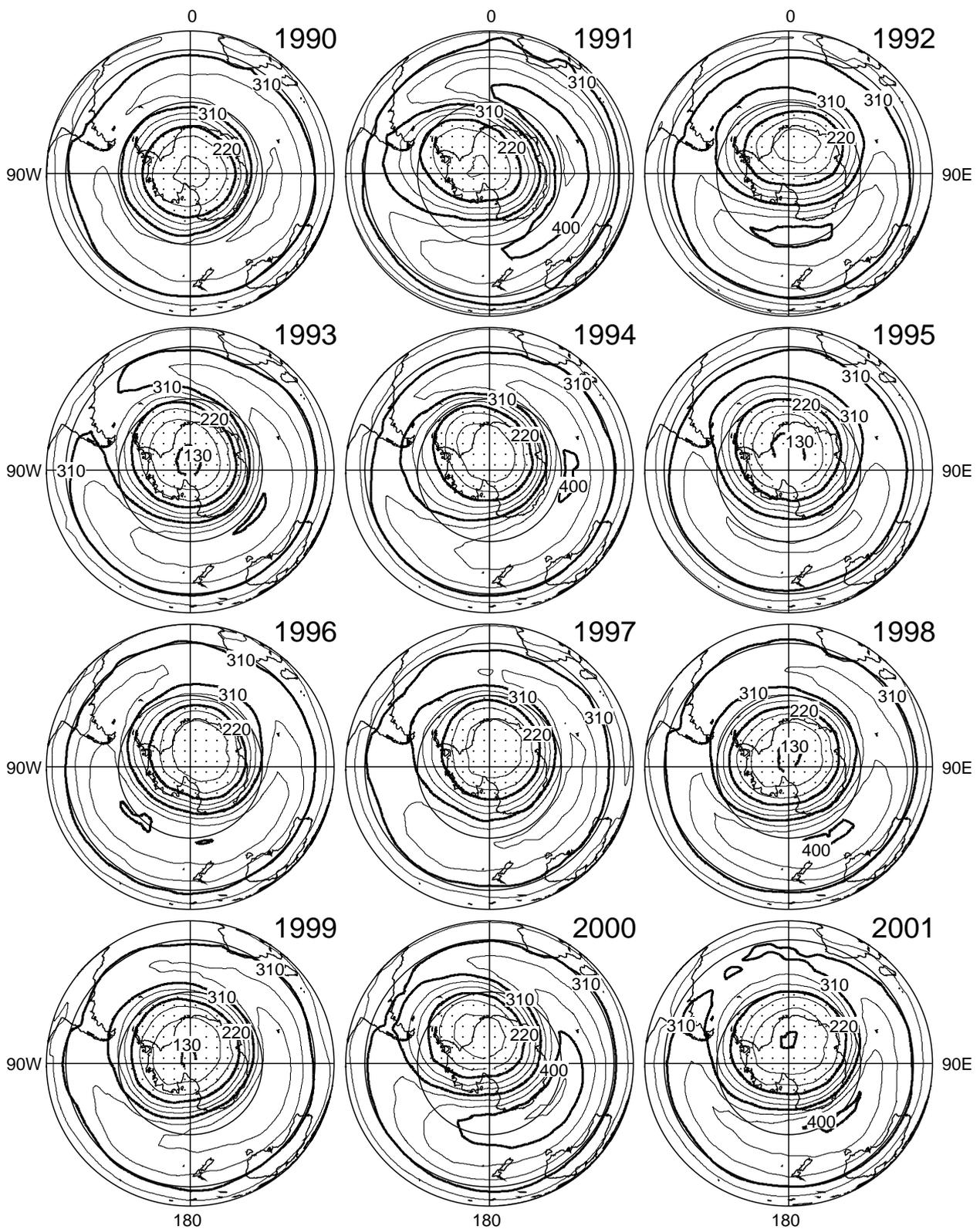


図3 - 4 - 5 (2) : 10 月の月平均オゾン全量の南半球分布図

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

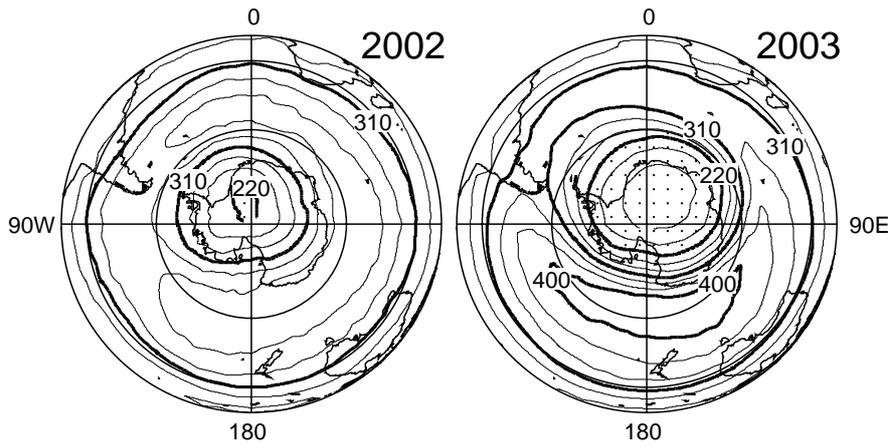


図3 - 4 - 5 (3) : 10月の月平均オゾン全量の南半球分布図
前ページから続く。

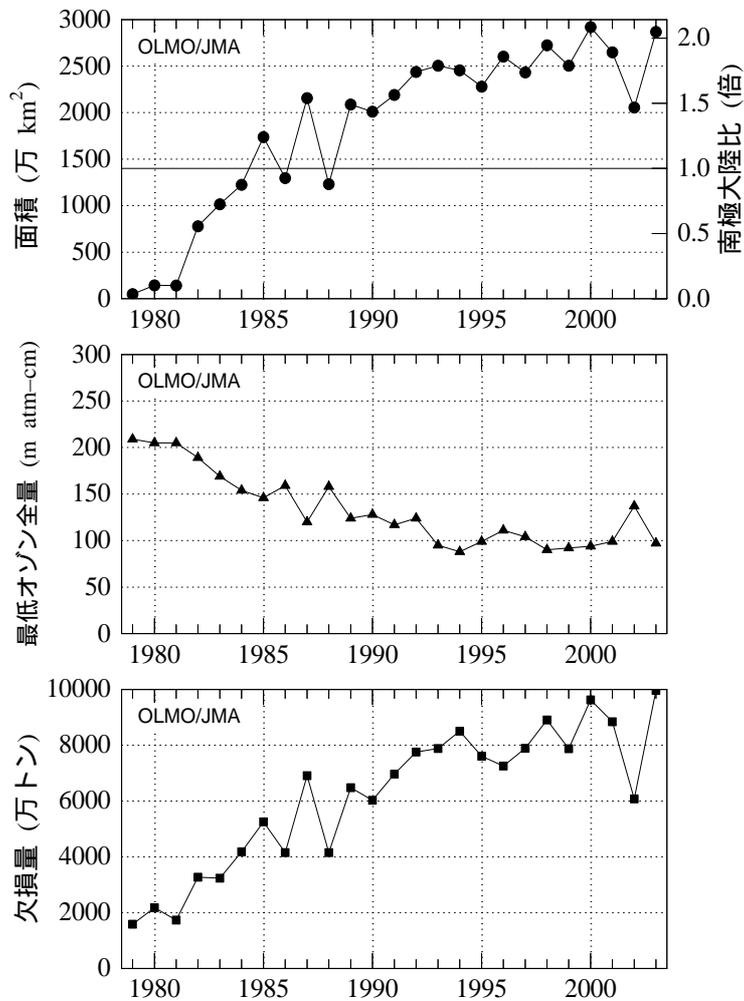


図3 - 4 - 6 : オゾンホール規模の経年変化

1979 ~ 2003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した。

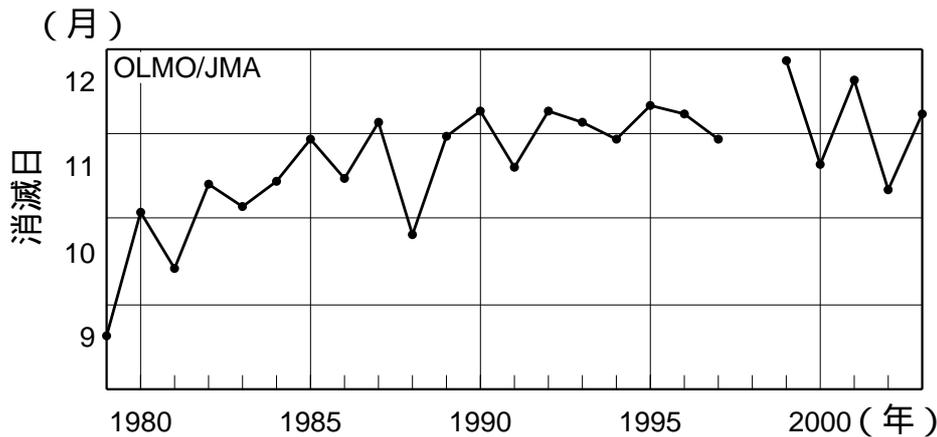


図3 - 4 - 7 : 南極域で220m atm-cm以下の領域が見られなくなった日の経年変化

1979 ~ 2003 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1998年のオゾンホール消滅は12月16日以降であるが衛星のデータが得られなかったため、詳細な期日は不明。1995年についてはSBUV/2のデータを基に作成。

(解 説) オゾンホールの規模の統計的な推定法について

オゾンホールの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の規模の予測を公表している。