

第2部 オゾン層等の状況

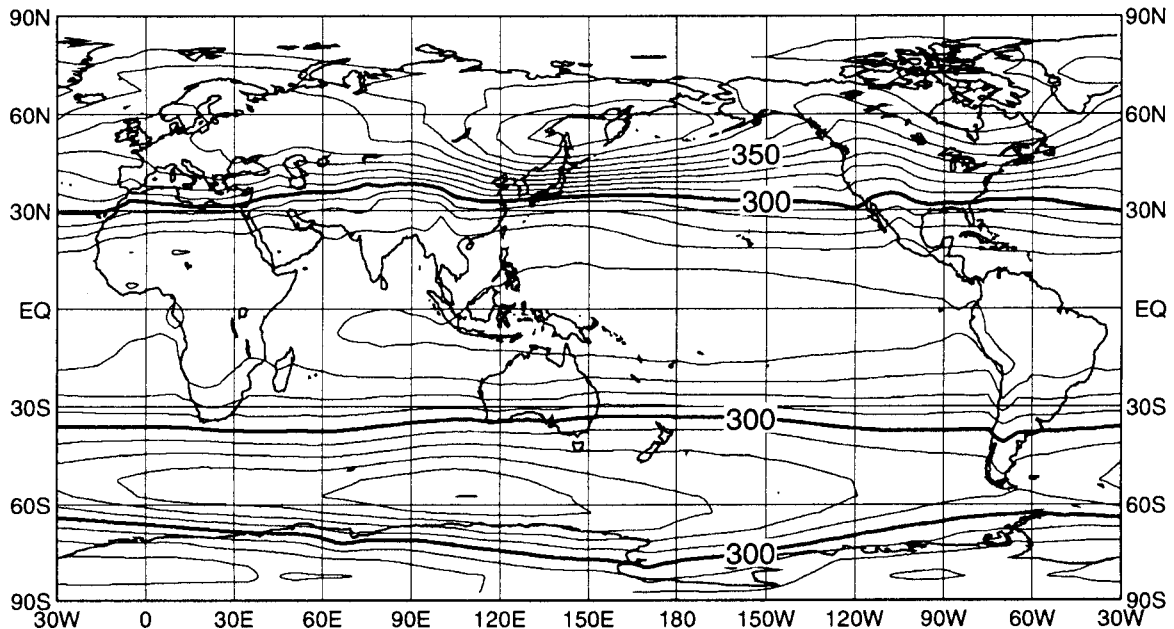
オゾン層の状況

1. 全球的なオゾン層の状況

(1) 世界のオゾン全量の分布

図1に1979年1月から1992年12月までの世界のオゾン全量の参照値^{*1}を同期間のTOMS (p.69 表6 参照)のデータをもとに示す。なお、この図は、1つの衛星により得られたTOMSデータにより作成されているため、基本的な指標として用いられることが多い。

この図によれば、オゾン全量は赤道域では少なく、南北両半球とも高緯度で多く、特にオホーツク海上空で最も多い。また、南北の傾度は全体的に南半球に比べて北半球で大きく、日本付近で非常に大きい。



単位は m atm-cm^2 、等値線間隔は 10 m atm-cm 毎

図1 世界のオゾン全量 (1979~1992年の累年平均)

TOMSデータにより作成。
(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2001

^{*1} 気象庁では、Nimbus-7衛星によるTOMSデータがほぼ全球で継続して取得できた期間(1979~1992年)の累年平均値を参照値としている。

^{*2} m atm-cm (ミリアトモスフェアセンチメートル) : オゾン全量を表す単位。DU (ドブソン単位) ともいう。オゾン全量とは大気鉛直気柱に含まれるオゾン量をいい、 1 m atm-cm は $2.687 \times 10^{20} \text{ 分子} \cdot \text{m}^{-2}$ に等しい。 300 m atm-cm は、この気柱の中の全てのオゾンをも0.1気圧に圧縮したとき、3mmの厚みに相当する。

図 2 - 1、2 に、2001 年の世界のオゾン全量について、月別平均オゾン全量・比偏差*を TOMS のデータをもとに示す。

この図によれば、オゾン全量は年間を通して参照値（1979～1992 年）よりも少ない領域が多く、特に 9、10 月はほぼ全球で少なかった。緯度帯別に見ると、低緯度では、北半球低緯度で 4、7 月、南半球低緯度で 11、12 月が多かった他は、少なかった。北半球中緯度では、年間を通して少なく、9～11 月が特に少なかった。また、12 月にはアラスカ付近上空で 10%以上多く、米国東海岸上空から大西洋上空にかけて 10%以上少なかった。北半球高緯度では、3～5 月は参照値より 2%以上少なく、8 月以降は 10 月を除いて参照値よりも多くなった。特に 3 月にカナダ北東部上空、4 月に北極海上空、5 月にカナダ東部上空で、10%以上少ない領域が広がった。南半球中緯度は、年間を通して少なく、地域的には 10 月に大西洋上空からインド洋上空で少なかった。南半球高緯度は、年の始めから少ない状況が続いており、8～12 月に 10%以上少なかった。10、11 月には南極大陸のインド洋側上空で 40%以上少ない領域が広がった。

* 比偏差とは、参照値からの偏差と参照値との比（%）

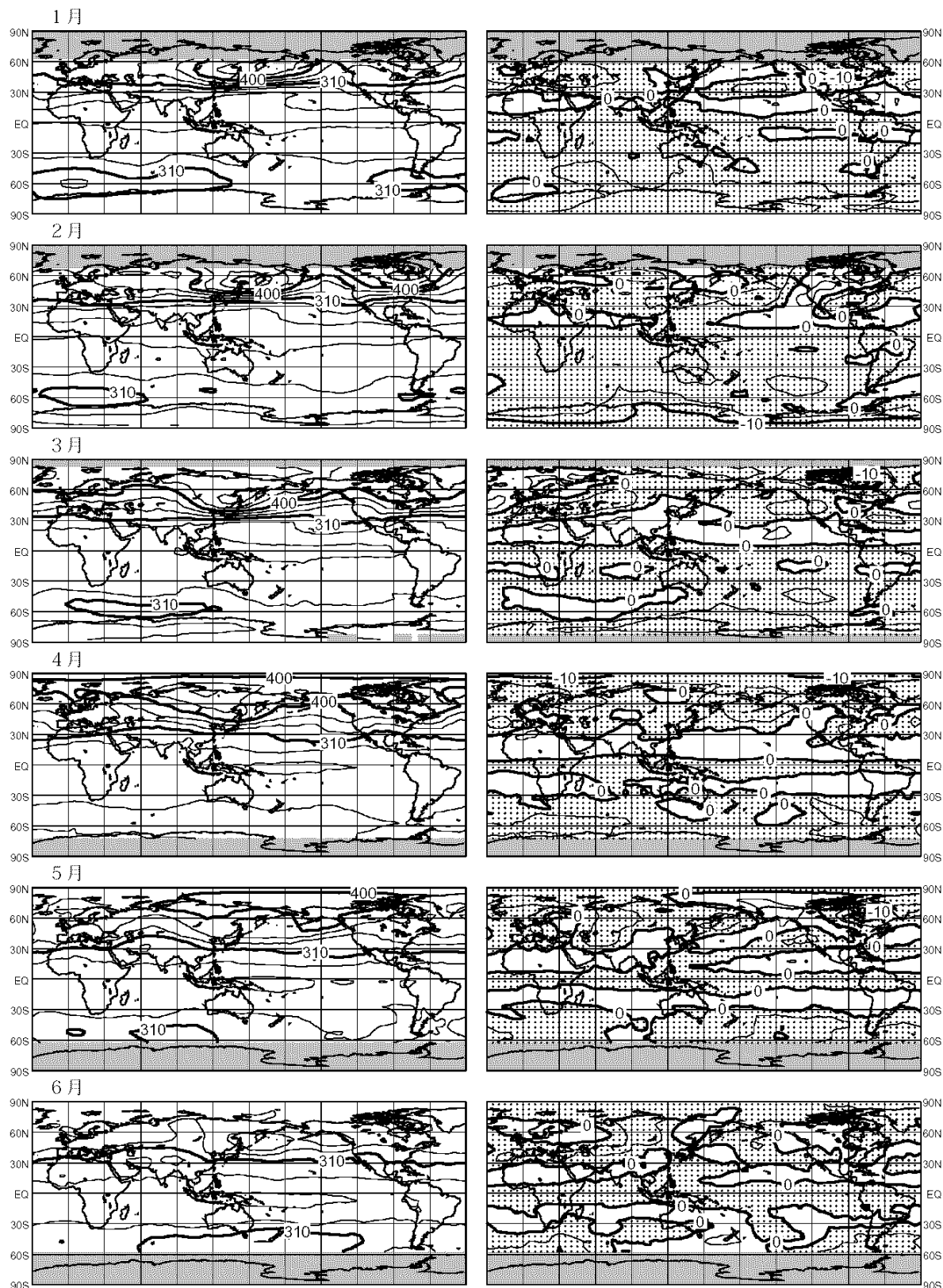


図2-1 世界の月別平均オゾン全量・比偏差(2001年1~6月)

等値線間隔は、平均オゾン全量(左図)については30 m atm-cm 毎、比偏差(右図)については5% 毎。陰影部は極域でデータの取得ができない領域。点域は参照値より少ない領域を示す。NASA提供のTOMSデータを基に気象庁で作成。

(出典)気象庁 オゾン層観測報告2001

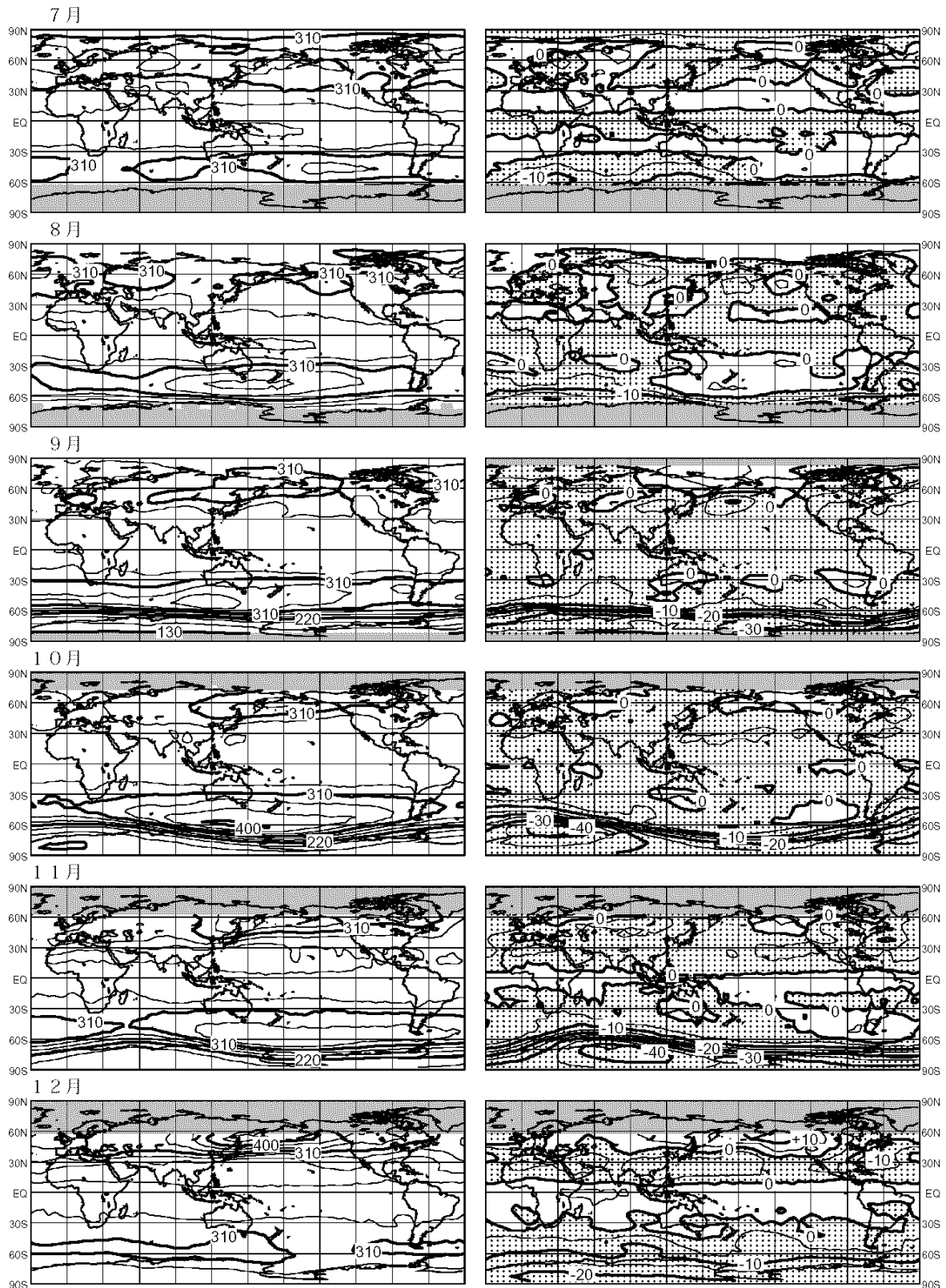


図 2-2 世界の月別平均オゾン全量・比偏差 (2001 年 7 ~ 12 月)

等値線間隔は、平均オゾン全量 (左図) については 30 m atm-cm 毎、比偏差 (右図) については 5 % 毎。陰影部は極域でデータの取得ができない領域。点域は参照値より少ない領域を示す。NASA 提供の TOMS データを基に気象庁で作成。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2001

(2) オゾン全量のトレンド

ア. オゾンの変動要因

大気中のオゾン量は、季節変動、準2年周期振動(QBO*)、太陽活動等の自然要因に加えて、CFC等による人為的な要因によっても影響を受ける。その季節変化を見るために、一例として、緯度帯ごとの月別オゾン全量を図3に示す。一般的に中高緯度のオゾン全量は北半球、南半球ともに春先に最大となり、秋に最小となる季節変化がみられる。

太陽活動はオゾンの生成・消滅に関する光化学反応を通してオゾン量と関係している。また、QBOはオゾンの輸送に関する循環(ブリューワー・ドブソン循環)の強さを変えること等で、オゾン全量の分布に影響する。例えば、赤道上空50hPaでの東西風が東風のとき、熱帯でオゾン全量が減少し、逆に西風のとき、中高緯度でオゾン全量が減少すること等が観測事実から確認されている。

このような、オゾンに対して周期的に影響を与える自然変動要因を取り除くことでノイズ量を減らし、信頼性の高い(誤差の少ない)トレンド(長期変化傾向)を算出することができる(図4、5を参照)。

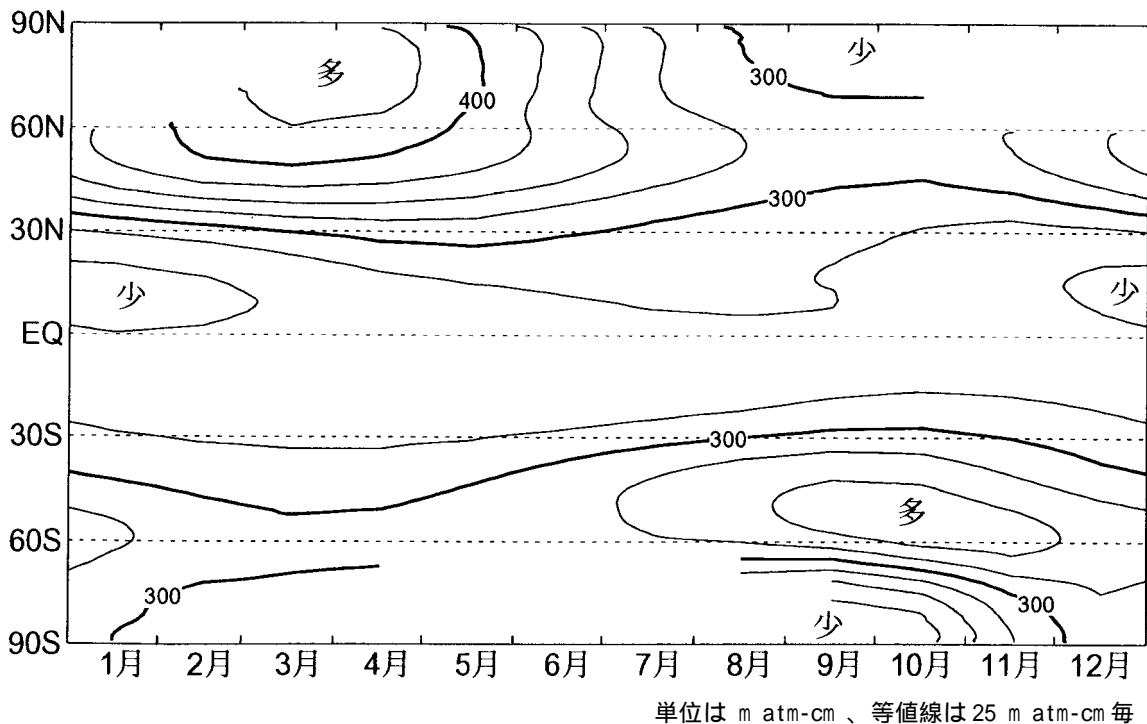


図3 緯度別平均オゾン全量の季節変化(1979~1992年の平均値)

TOMSデータにより作成。図中、極域での等値線のない部分があるのは、人工衛星による観測では両極域のデータは冬季に得られないため。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2001

*赤道下部成層圏において、約2年の周期で西風と東風が交互に出現することをいう。ここではQBOの指標としてシンガポール(北緯1度,東経104度)上空50hPaでの東西風を用いている。

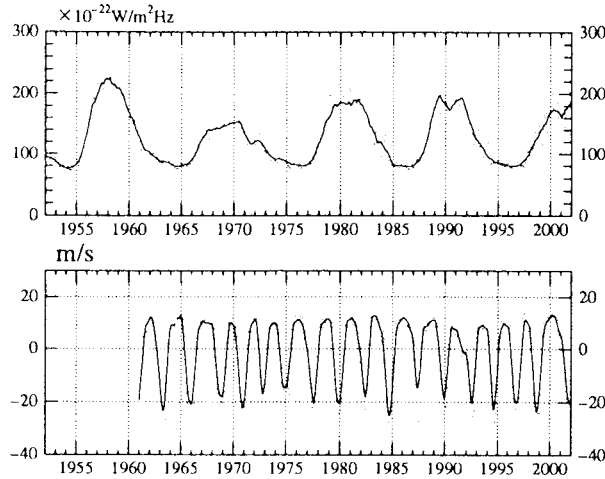


図4 既知の自然変動要因

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)で、実線は13ヶ月移動平均値。下図は、シンガポール上空の50hPa面における風の東西成分、実線は7ヶ月移動平均。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2001

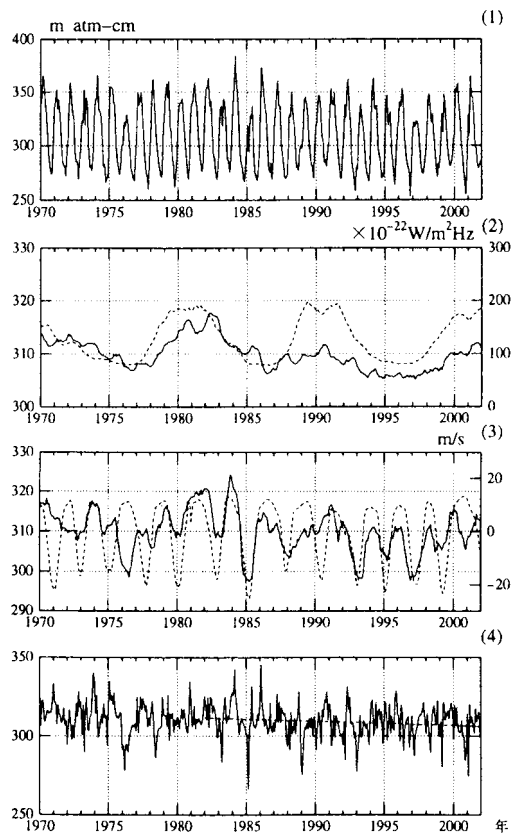


図5 つくばにおけるオゾン全量トレンドの解析例

(1)月平均値、(2)月平均偏差の49ヶ月移動平均値(太線)と太陽電波フラックスの13ヶ月移動平均値(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ヶ月移動平均値(太線)とQBOの7ヶ月移動平均値(破線:6ヶ月ずらして表示)、(4)季節変化、太陽活動及びQBO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)。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2001

イ．UNEP科学パネルによるトレンドの解析

WMO、UNEP、米国のNASA、NOAA等が協力して組織したオゾントレンドパネルは、1988年、ドブソン分光光度計による地上からの観測データの解析を行った。その後、UNEPがモントリオール議定書に基づき設置した科学パネルは、1989年、新たなデータも加え、各種の統計手法を用いてオゾンのトレンド^{*}を解析し、1991年及び1994年にその時点で、利用可能なデータを加え、再度トレンドの解析を行った。さらに、科学パネルは、1998年に最新の解析結果をとりまとめた。

1998年の科学パネル報告では、ドブソン分光光度計、ブリューワ分光光度計、フィルター式オゾン計の3種類の地上からのオゾン全量観測データと、Nimbus-7、Meteor-3、Earth Probeの3つの衛星に搭載されたTOMSデータが使用された。すなわち、1978年12月～1993年4月まではNimbus-7のTOMSのデータが使用され、1993年5月～1994年10月まではMeteor-3のデータが、1996年8月～1998年3月まではEarth Probeのデータが使われた。ただし、Meteor-3については、太陽天頂角が80°を超えるデータについては信頼性が欠けるために使われていない。表1に、統合したTOMSデータによるトレンド解析結果を示す。

表1 南北両半球中高緯度及び熱帯域のオゾン全量の平均トレンド（1979～1997年）

	年間	12月～5月 [*]	6月～11月 ^{**}
北半球高緯度（50°N～65°N）	-3.7±1.6	-4.4±2.6	-2.8±1.3
北半球中緯度（30°N～50°N）	-2.8±1.7	-3.8±2.4	-1.7±1.3
熱帯域（20°N～20°S）	-0.5±1.3	-0.3±1.6	-0.7±1.3
南半球中緯度（30°S～50°S）	-1.9±1.3	-2.4±1.2	-1.4±1.9
南半球高緯度（50°S～65°S）	-4.4±1.8	-3.4±1.6	-5.2±2.6

^{*}は、北半球の冬季～春季と南半球の夏季～秋季、
^{**}は、北半球の夏季～秋季と南半球の冬季～春季。
 数値は、10年間当たりの%変化と95%信頼幅を示す。

（出典）WMO/UNEP科学パネル報告書（1998年）

^{*}各種オゾン量（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数値として、季節変化・太陽活動・QBOといった自然要因によるほぼ周期的なオゾン変動を除去したときの変化率（10年当たりの百分率）。

図6に3つのTOMSによる衛星データと世界各地のドブソン分光光度計等による地上からの観測データに基づく南緯60度～北緯60度のオゾン全量の変化を示す。

北緯60度から南緯60度まで積分したオゾン全量は、1991年5月までは2.0%/10年の割合で減少してきたが、1992年から1993年にかけては、1991年6月に起こったピナトゥボ火山噴火の影響のため、オゾン全量の減少が一時的に促進された*。しかし、1994年には回復してその影響が少なくなり、オゾン全量は、ほぼ1991年までのデータにより求められたトレンドを外挿した値に戻っている。

なお、衛星データでは外挿した値よりも約2%ほど回復しているように見えるが、1996年以降のEarth Probe TOMSデータの信頼性についてはまだ検討の余地があることに留意する必要がある。

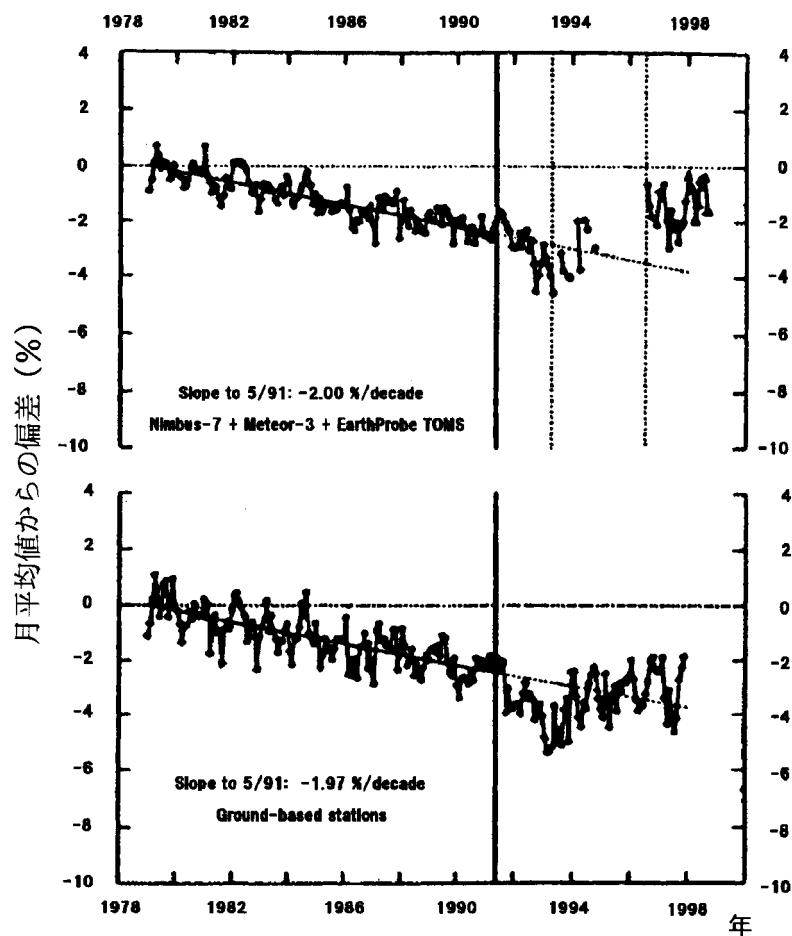


図6 北緯60度から南緯60度までのオゾン全量の変化(1979年1月～1998年9月)

Nimbus - 7とMeteor - 3、Earth Probe の3つの衛星データを統合したTOMSのデータ(上図)と、世界各地のドブソン分光光度計の地上観測データ(下図)を北緯60度から南緯60度まで積分したものの1979年1月の月平均値に対する偏差を%で表した。季節変化、太陽活動及びQBOによる変動成分を除去してある。直線は1991年5月までのデータに対して最小自乗近似を行って得られた。上図での傾きは10年間当たり-2.00%、下図では-1.97%である。図中で、縦の太線はピナトゥボの火山爆発の時期を、縦の点線は1つのTOMS衛星データから別の衛星データに切り替わったことを示している。

(出典) WMO/UNEP科学パネル報告書(1998年)

* 1991年のピナトゥボ火山の噴火は、地球全体の下部成層圏における硫酸エアロゾルの大きな増加をもたらし、オゾン減少を促進した(p.85参照)。

図7に1997年までのデータにより求められた季節及び緯度によるオゾン全量トレンドの変化を示す。TOMS衛星データと地上観測データとはほぼ同様なトレンドを示している。北半球中緯度ではすべての季節で統計的に有意な負のトレンドがあること(冬・春季-3~-6%/10年、夏・秋季-1~-3%/10年)、南半球中緯度でも年平均で統計的に有意な負のトレンドがあることが示された。しかし、6、7、8月の減少傾向は、統計的に有意ではない。両半球の高緯度では、負のトレンドがより大きい。特に南半球の春季での負のトレンド(最高-10%/10年)が大きい。これは南極域でオゾンホールが発達したことによる。熱帯域でも負のトレンドがあるが、統計的に有意でないとは評価されている。

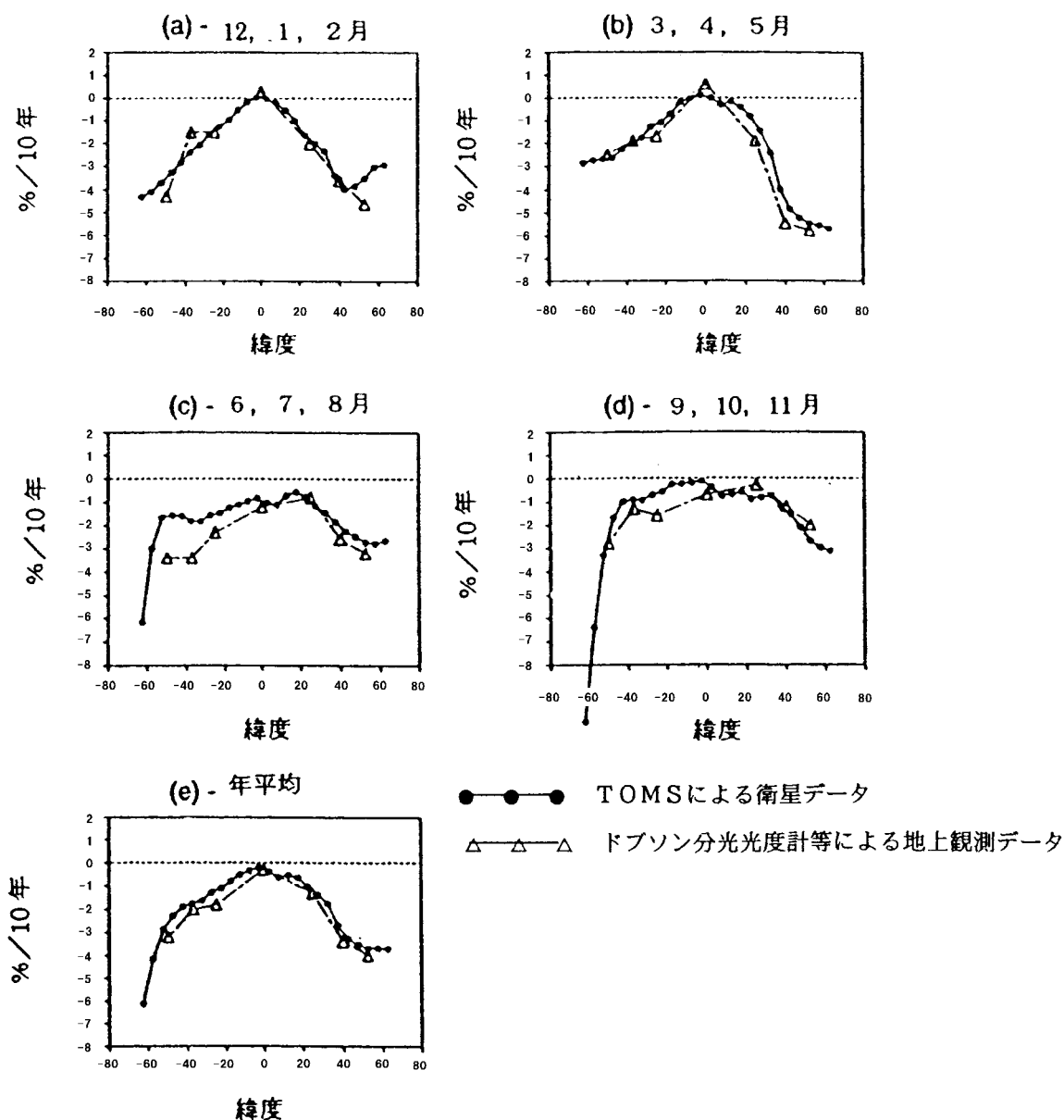


図7 緯度別・季節別オゾン全量トレンド(1979年1月~1997年12月)

Nimbus - 7 (1979年1月~1993年4月)とMeteor - 3 (1993年5月~1994年11月)、Earth Probe (1996年8月~1997年12月)の3つのTOMS及びドブソン分光光度計等による。(出典)WMO/UNEP科学パネル報告書(1998年)

ウ．我が国での解析結果

図8に世界の観測地点における地上からのデータを使用して求めた最近20年間(1982~2001年)のオゾン全量トレンドの緯度分布を示す。この過去20年間のトレンドでは通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となっている。特に北半球の30度以北では通年及び3~5月に有意な減少を示している地点が多い。南極域の9~11月はオゾンホールの影響で15%/10年を越える減少を示している。これらの解析結果から過去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。

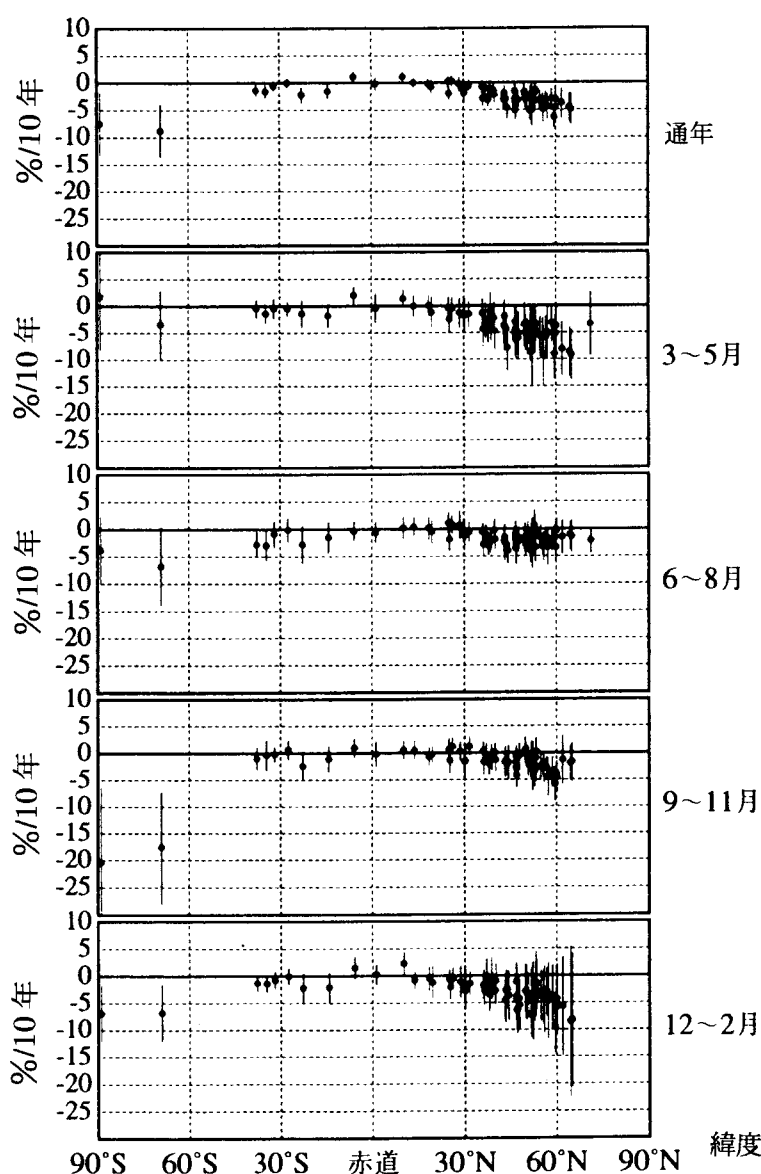


図8 オゾン全量トレンドの緯度分布(1982~2001年;通年)

1982~2001年の観測地点(99地点)における、季節変化、太陽活動、QBOの影響を除去したオゾン全量に直線回帰を適用したトレンド。横軸に緯度、縦軸にトレンドを表す。それぞれの点が各観測所におけるトレンドを示し、縦棒はそのトレンドの95%信頼限界の範囲を示す。上から順に、通年、(3~5月)、(6~8月)、(9~11月)、(12~2月)におけるトレンド(%/10年)。
(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2001

図9に1979年1月から2000年12月までのTOMSによるオゾン全量データから求められたトレンドを示す。ドットを付けた領域は変化率が-3%/10年を超える領域である。同じ緯度帯でも経度方向によりトレンドが異なる。北緯60度帯付近ではシベリア北部及びヨーロッパ北部上空で減少率が大きく、北アメリカ西部は減少率が小さい。また南緯60度帯ではオーストラリア沖から南太平洋上空でオゾン減少率が比較的小さく、南アメリカ沖からアフリカ沖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。

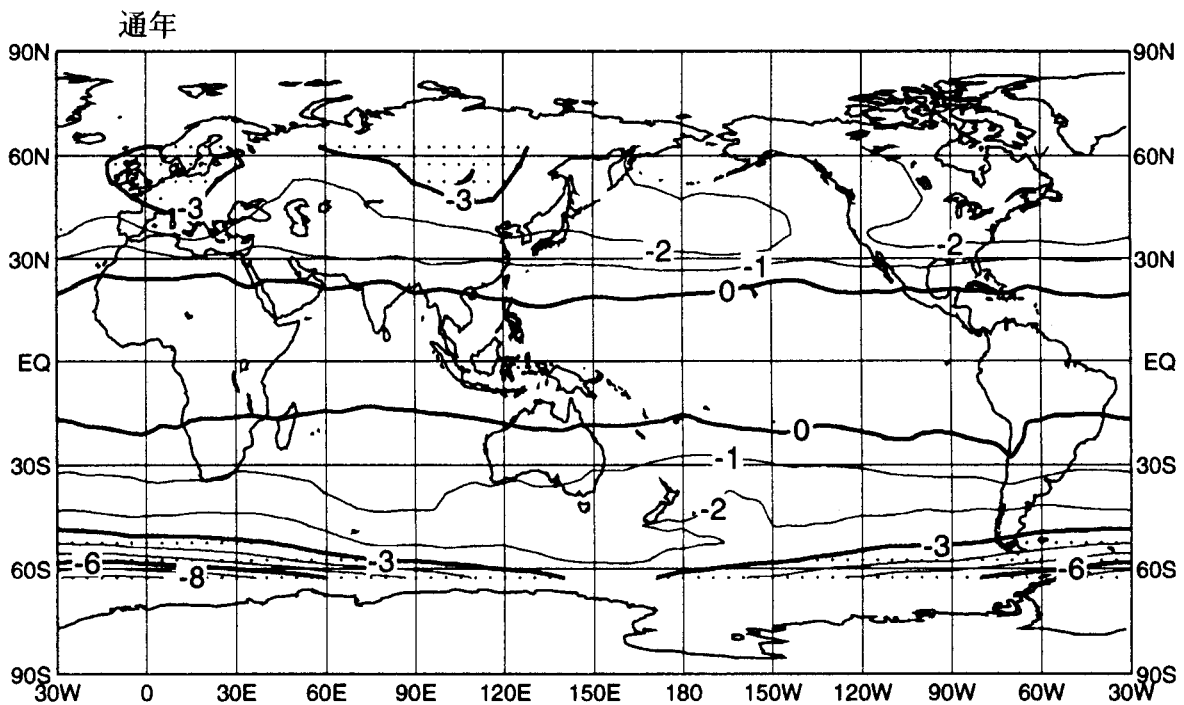


図9 オゾン全量のトレンドの全球分布(1979~2000年;通年)

NASA提供のTOMSデータにより作成。格子点(5°メッシュ)ごとのオゾン全量時系列に季節変化、太陽活動、QBOによる変動成分を除去した後、直線回帰を適用して評価。等値線は1%/10年毎、ドット域は-3%/10年を超える領域。なお、両極域については、人工衛星による観測では、冬季のデータが得られないため、トレンドが求められない。なお、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でデータの見直しが行われている。TOMSデータを用いたトレンドについては、特に2001年のTOMSデータの検証が十分でないため、2000年までのデータを使って評価した結果を示した。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告2001

図 10 に図 9 と同期間について求めた緯度別に平均したオゾン全量トレンドの月別分布を示す。南半球高緯度ではオゾンホールが出現する 9 ~ 12 月に、また、北半球高緯度では 3 ~ 4 月にオゾンの減少傾向が大きい。

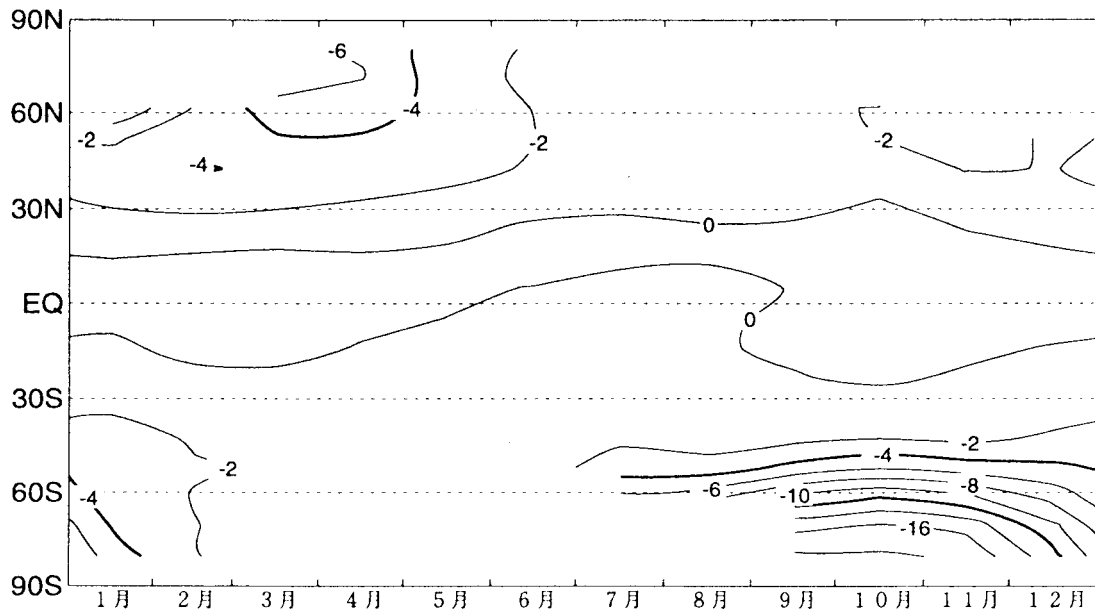


図 10 オゾン全量トレンドの緯度別・月別変化 (1979~2000 年)

TOMS データにより作成。格子点 (5°メッシュ) ごとの月平均オゾン全量について、緯度 10° 毎の緯度別の平均値を求め、季節変化、太陽活動、QBO による変動成分を除去した後、直線回帰を適用して評価。等値線は 2% / 10 年毎。なお、両極域については、人工衛星による観測では、冬季のデータが得られないため、トレンドが求められない。なお、TOMS には 2000 年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 でデータの見直しが行われている。TOMS データを用いたトレンドについては、特に 2001 年の TOMS データの検証が十分でないため、2000 年までのデータを使って評価した結果を示した。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2001

(3) オゾンの高度分布のトレンド

図 11 に衛星センサー SBUV 及び SAGE、ドブソン分光光度計を用いた反転観測、オゾンゾンデ観測の 4 つのデータを統合したオゾンの高度別トレンドを示す。1980～1996 年の北半球中緯度（北緯 30 度～50 度）のデータを用いた。高度 40km の上部成層圏と、高度 15km の下部成層圏で、それぞれ $(-7.4 \pm 2.0) \% / 10 \text{年}^*$ 、 $(-7.3 \pm 4.6) \% / 10 \text{年}^*$ と減少傾向が大きい。反対に、最も減少傾向が小さいのは、高度 30km である。このように、北半球中緯度では、高度 12～45km の間で統計的に有意な減少傾向が見られる。

また、図 12 は SAGE の衛星データより求めた、オゾントレンドの緯度 - 高度変化を示す。中高緯度の高度 40km 付近で減少トレンドが大きい。

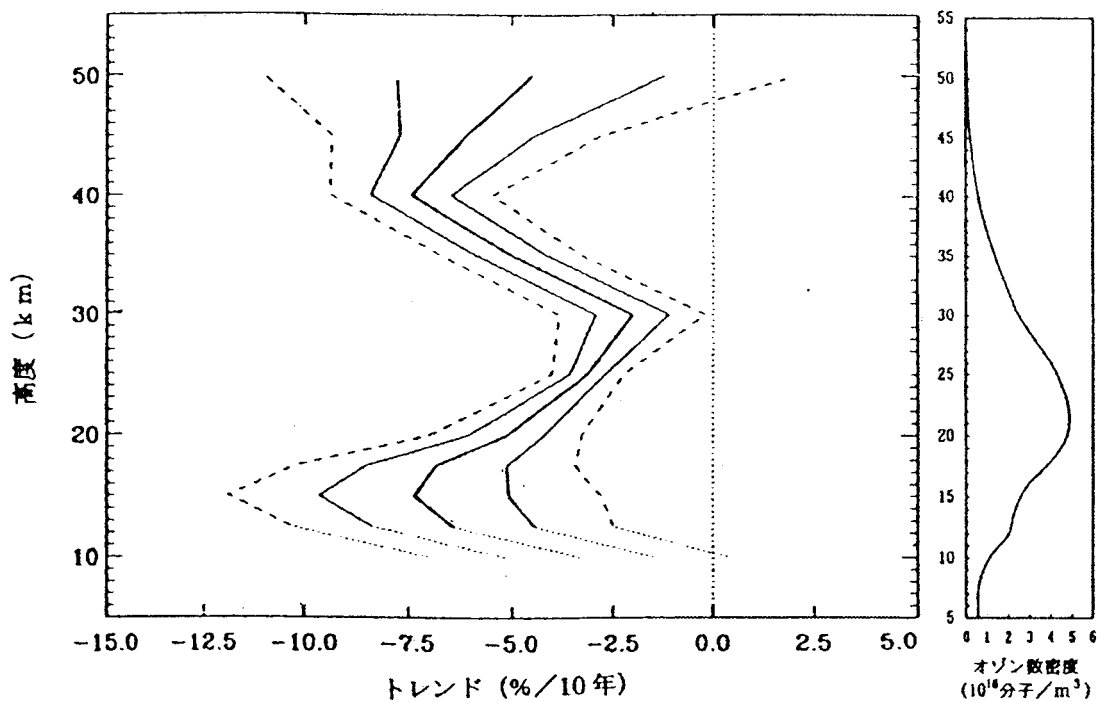


図 11 北半球中緯度（北緯 30 度～50 度）の高度別オゾントレンド（1980～1996 年）

太線は 4 つの方法によって得られたデータの間接値を示す。細線と破線は、統合された信頼幅を示す（それぞれ 及び 2 ）。12.5km 以下の細い点線はこれらの傾向を、高度 10km まで伸したトレンドを示す。10km より下の対流圏については、ゾンデのデータ数が少なく信頼性に欠けるため、トレンドは示されていない。また、高度 15km より下の結果については、対流圏と成層圏のトレンドを混合したものであるため、データの正確さについては注意が必要である。右図は、オゾンの典型的な高度分布を示した。（出典）WMO/UNEP 科学パネル報告書（1998 年）

* ()内の数値の信頼区間は 2 。

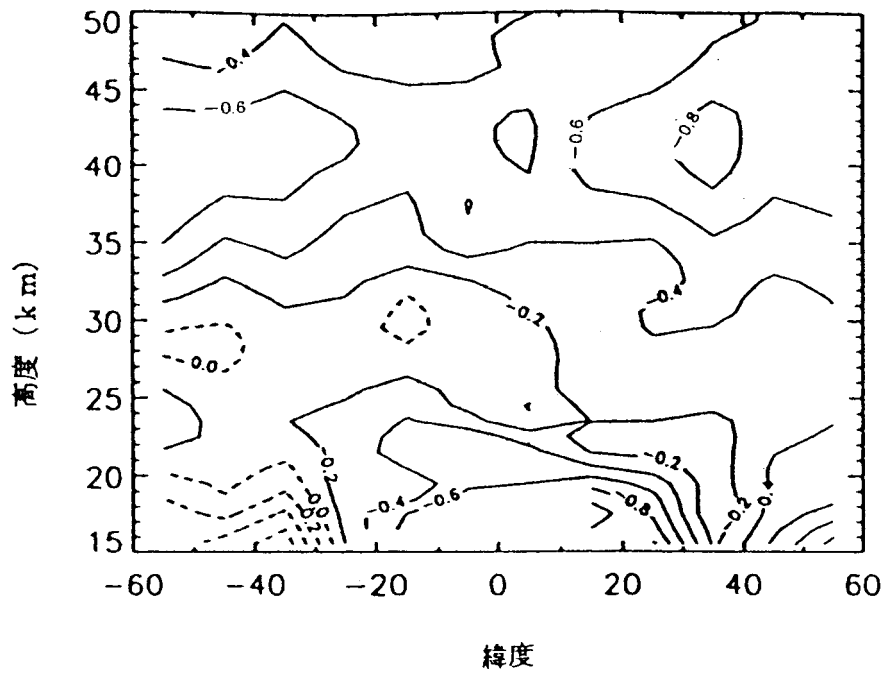


図 12 成層圏オゾントレンドの緯度・高度変化(1984~1996)
 1984~1996年の期間におけるSAGE - の衛星データによるの年間オゾントレンド(%/年)。
 (出典)WMO/UNEP科学パネル報告書(1998年)