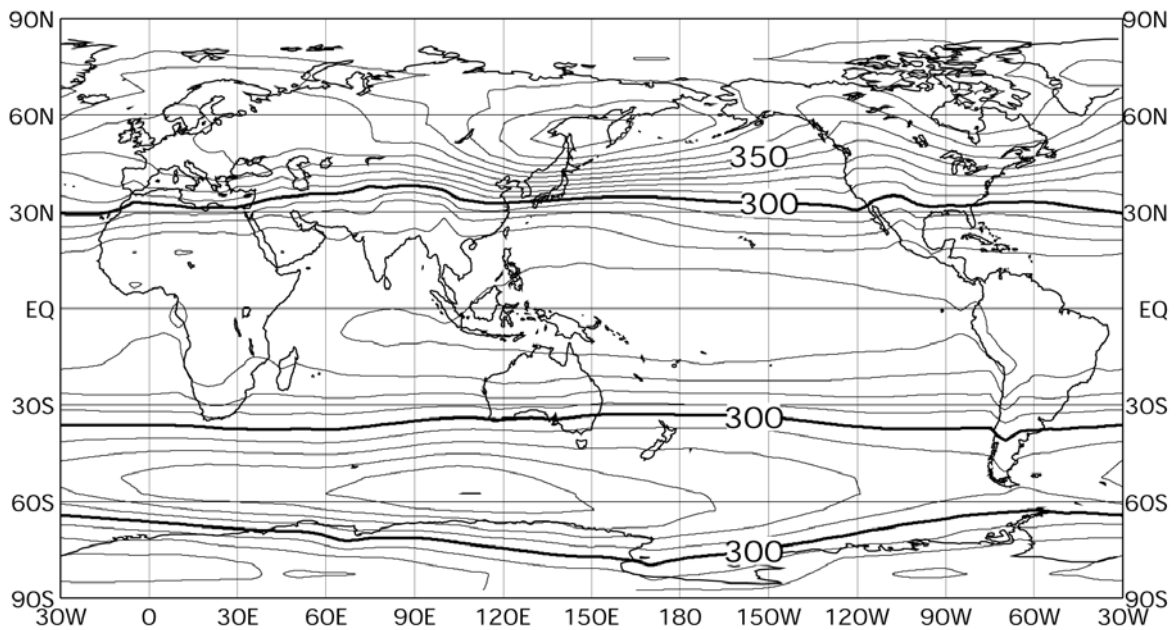


1. 全球的なオゾン層の状況

(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.72表6参照)のデータをもとに示す。

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、日本付近では最も大きい。



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 2002

^{*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、 3 mm の厚みに相当する。

図 2 - 1、2 に、2002 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、2002 年は、1979 年から 1992 年までの平均値である参照値に対して、南極域の 9 月頃を中心として最大 30% を超える正偏差が目立った。これは、後述するように、面積やオゾン破壊量で見たオゾンホールが 1991 年以降最小であったことを反映したものである。このほか、北半球では中緯度で 2 月頃を中心に、高緯度で 11 月頃を中心に 10% を超える負偏差が見られた。月々のオゾン全量は全球で平均すると、年の前半と年末に参照値より少ない傾向にあった。

* 比偏差とは、参照値からの偏差と参照値との比（%）

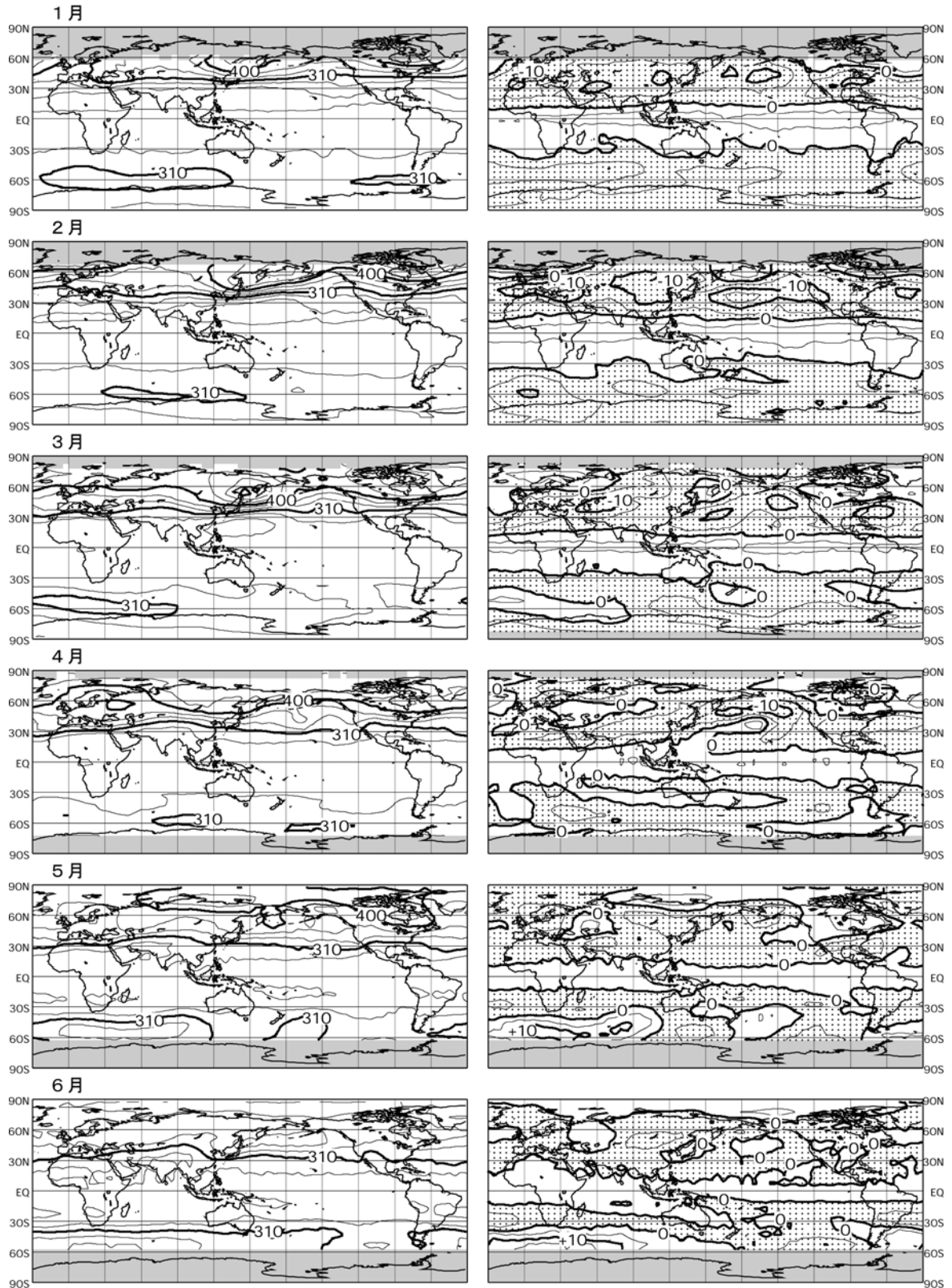


図 2 - 1 世界の月別平均オゾン全量・比偏差 (2002 年 1 ~ 6 月)

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 2002

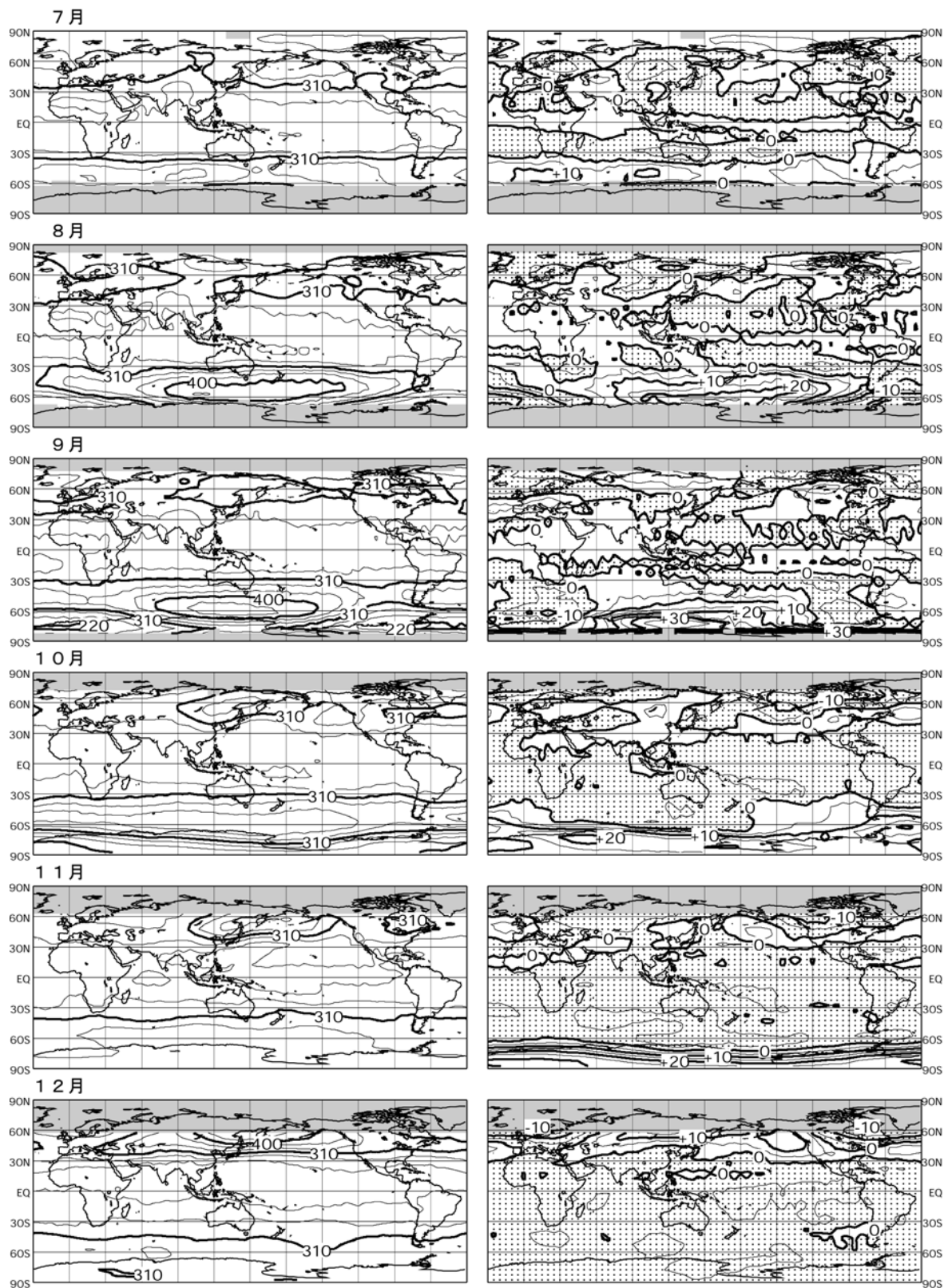


図 2 - 2 世界の月別平均オゾン全量・比偏差 (2002 年 7 ~ 12 月)

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 2002

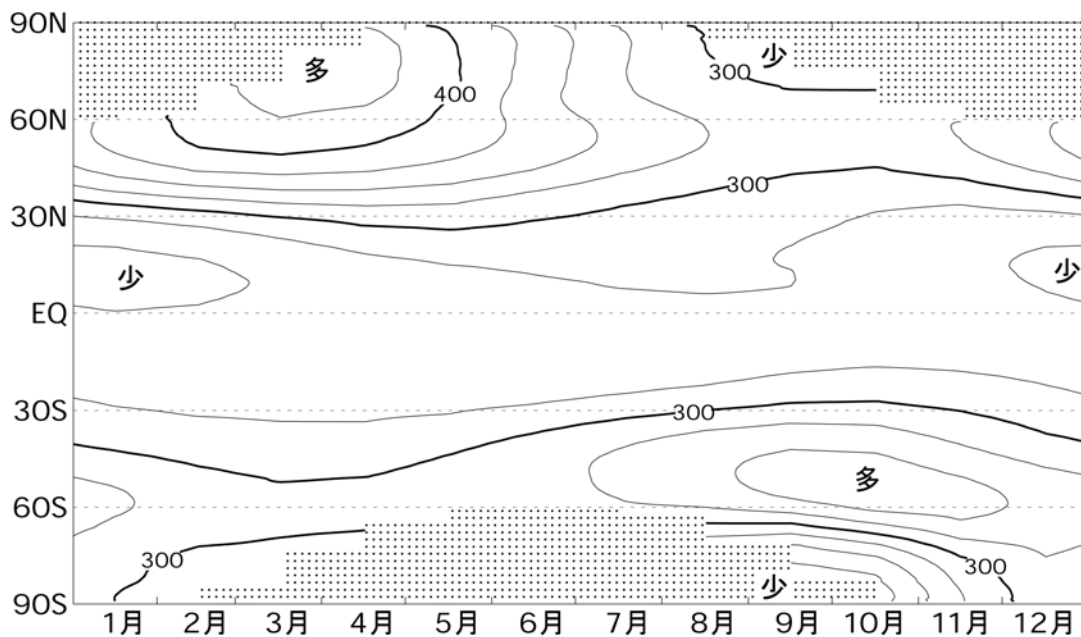
(2) オゾン全量のトレンド

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、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)。



単位は m atm-cm、等値線は 25 m atm-cm 毎

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陰影部分があるのは、人工衛星による観測では太陽散乱光を利用することから、太陽が射さなくなる冬季の両極域ではデータが得られないため。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2002

* 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。

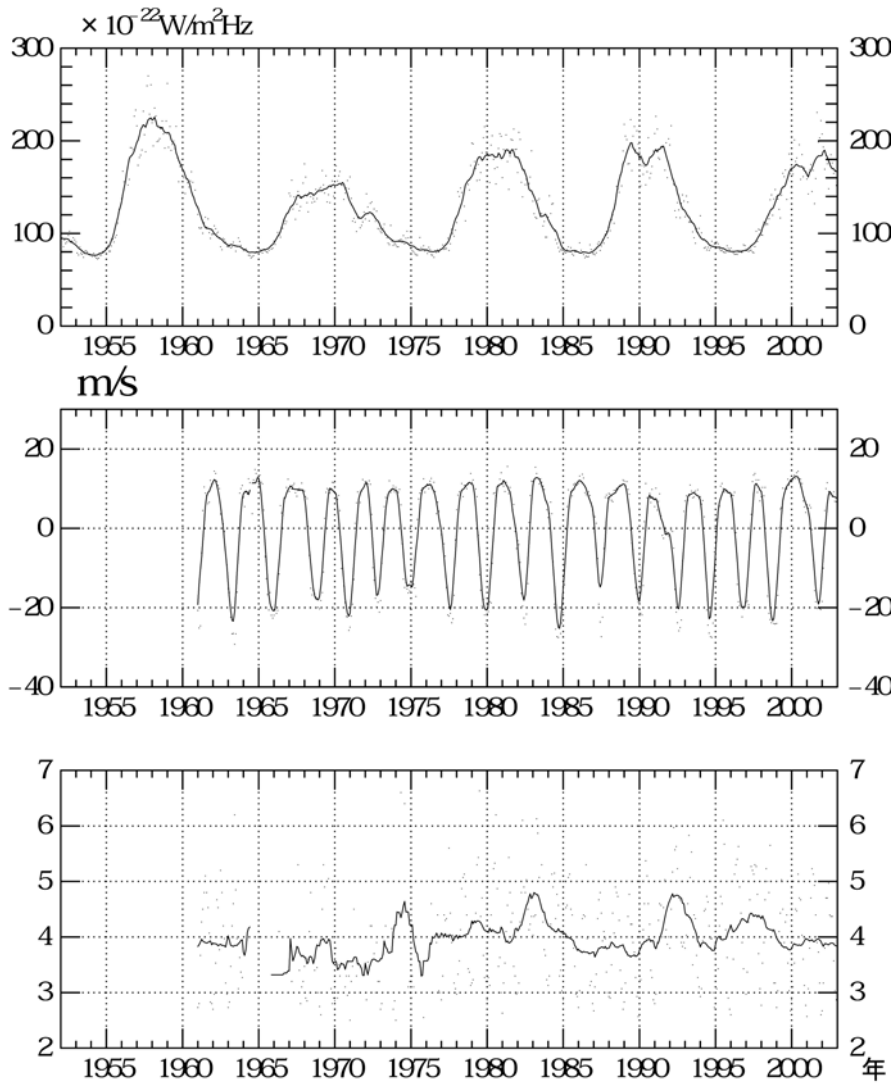


図4 既知の自然変動要因

一番上の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。中央の図は、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。下の図は、つくばにおける直達日射から評価した大気混濁係数で、実線は13ヶ月移動平均値。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2002

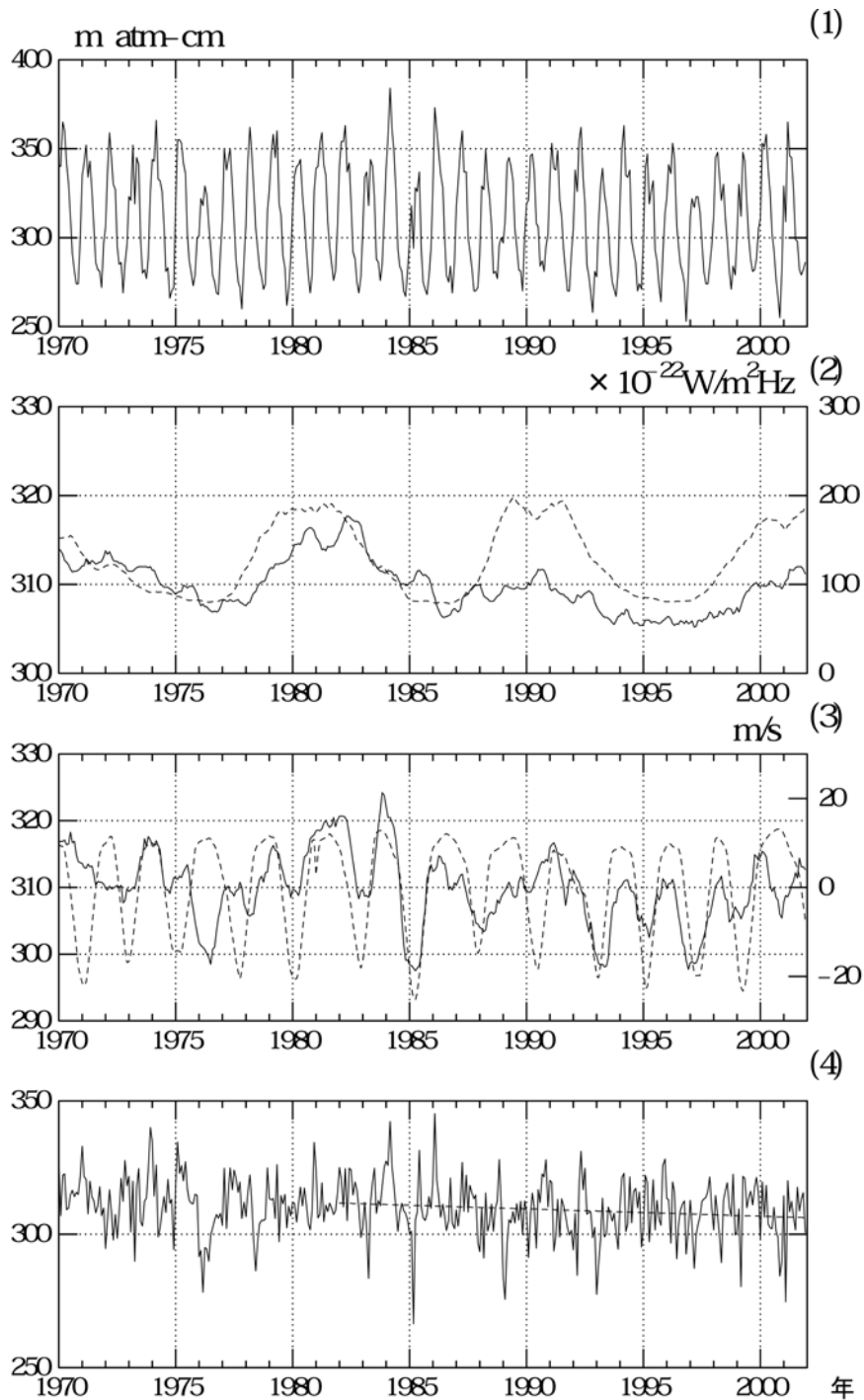


図5 つくばにおけるオゾン全量トレンドの解析例

(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 2002

イ．U N E P 科学パネルによるトレンドの解析

WMO、U N E P、米国のN A S A、N O A A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、U N E P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、1994年、及び1998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、2002年に地上観測データ、衛星観測データ等の5種類のデータセットを用いた最新の結果をとりまとめた。

表1に、1980年以前（1964-1980年の平均）と比較した最近5年（1997-2001年）の間のオゾン全量の減少率を示す。全球平均では3%の減少であるが、熱帯域では有意なオゾンの減少は見られない。北半球中緯度と南半球中緯度ではそれぞれ3%及び6%の減少であるが、北半球では冬から春にかけてオゾン減少が大きいのに対して、南半球では年間を通して同程度のオゾン減少が見られる。

表1 1980年以前^{*1}から最近5年（1997-2001）の間のオゾン全量の減少^{*2}

	年 間	冬 - 春	夏 - 秋
全球平均	3%		
熱 帯 域（25°N～25°S）	有意な減少なし		
北半球中緯度（35°N～60°N）	3%	4%	2%
南半球中緯度（35°S～60°S）	6%	6%	6%

^{*1} 1964-1980年の平均値

^{*2} 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变化。

（出典）WMO/U N E P科学パネル報告書（2002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に北緯90度 - 南緯90度のオゾン全量の変化を示す。1960年代半ばにオゾン全量観測が始まって以降1980年頃までは増加傾向も減少傾向も見られなかったが、1980年から1990年にかけてほぼ単調にオゾンが減少した。さらに、1992～1993年にはオゾン全量観測が始まって以降最小のオゾン全量（1980年以前より5%減少）が記録された。これは、1991年6月に噴火したピナトゥボ火山の影響であったと考えられている。その後、オゾン全量は1999年頃まで一旦増加に転じ、1997～2001年の平均値は1980年以前に比べて3%の減少であった。

図7に季節によるオゾン全量の推移を示す。これによると、北半球中緯度では特に冬・春期に年々の変化が大きく、1990年代の初めから中頃にかけて、-6～-12%の負の偏差が見られた。南半球中緯度は、北半球中緯度に比べて、季節による偏差の違いは少ない。

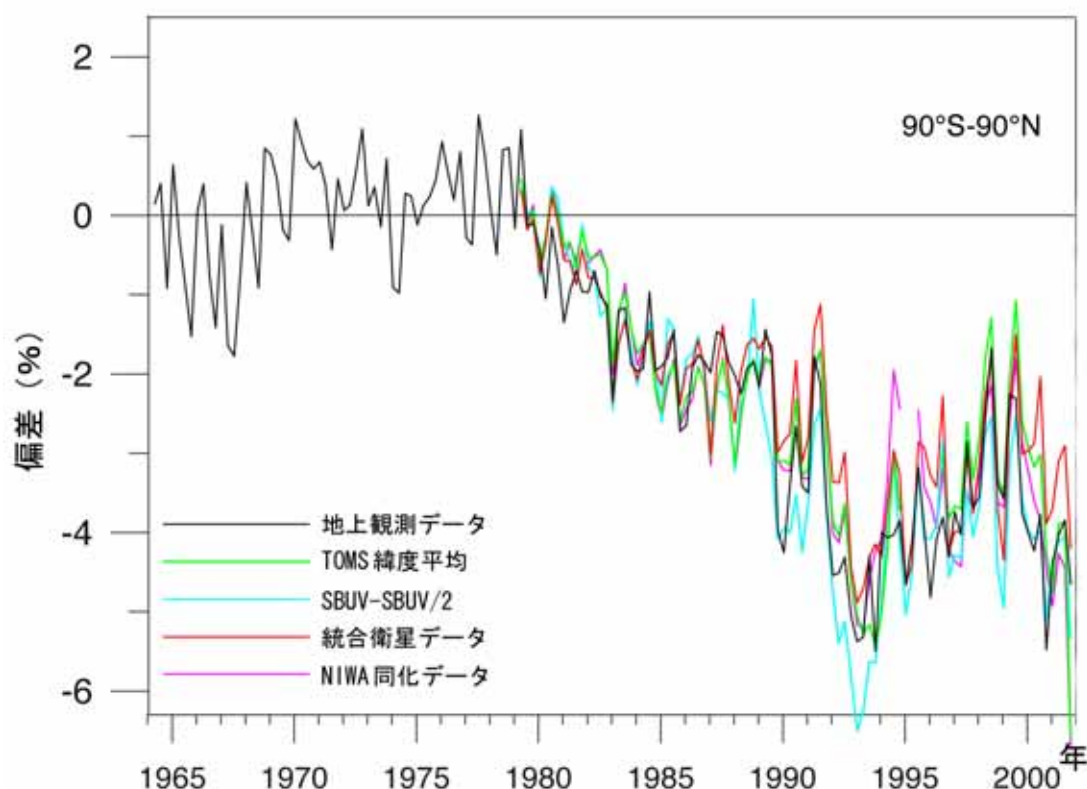


図6 全球のオゾン全量の変化

北緯90度から南緯90度まで積分したものの1964～1980年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。
 (出典) WMO/UNEP科学パネル報告書(2002年)

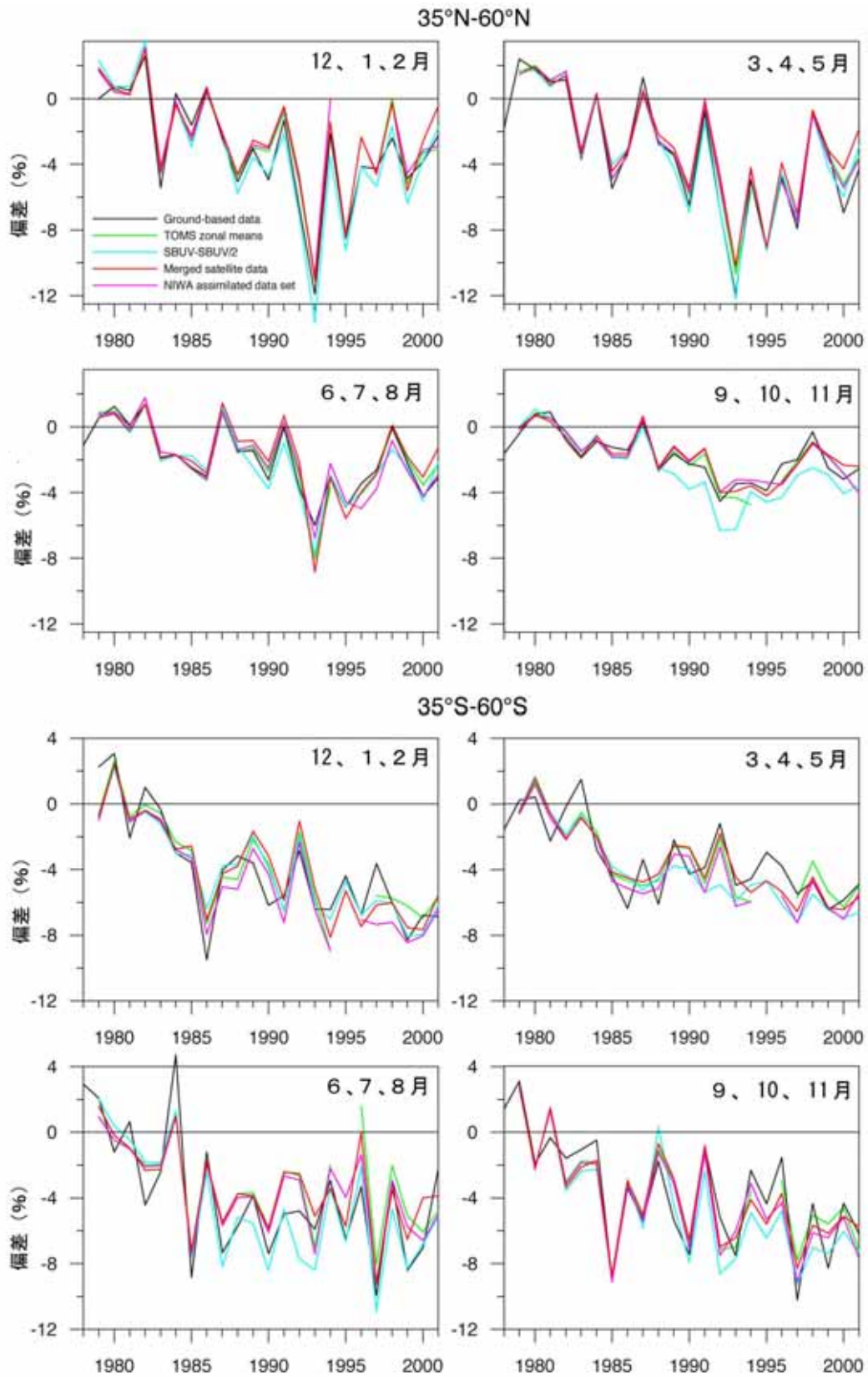


図7 緯度別・季節別オゾン全量の推移

北緯 35～60 度（上図）および、南緯 35～60 度（下図）のそれぞれの季節ごとの平均値の 1964～1980 年の平均値に対する偏差を%で表した。各色の線はそれぞれ、地上観測データ、TOMS 緯度平均、SBUV-SBUV/2、統合衛星データ、NIWA 同化データセットを示す。

（出典）WMO/UNEP 科学パネル報告書（2002 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(1983~2002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。南半球高緯度(南緯60度以南)の9~11月はオゾンホールのため著しい減少を示している。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。

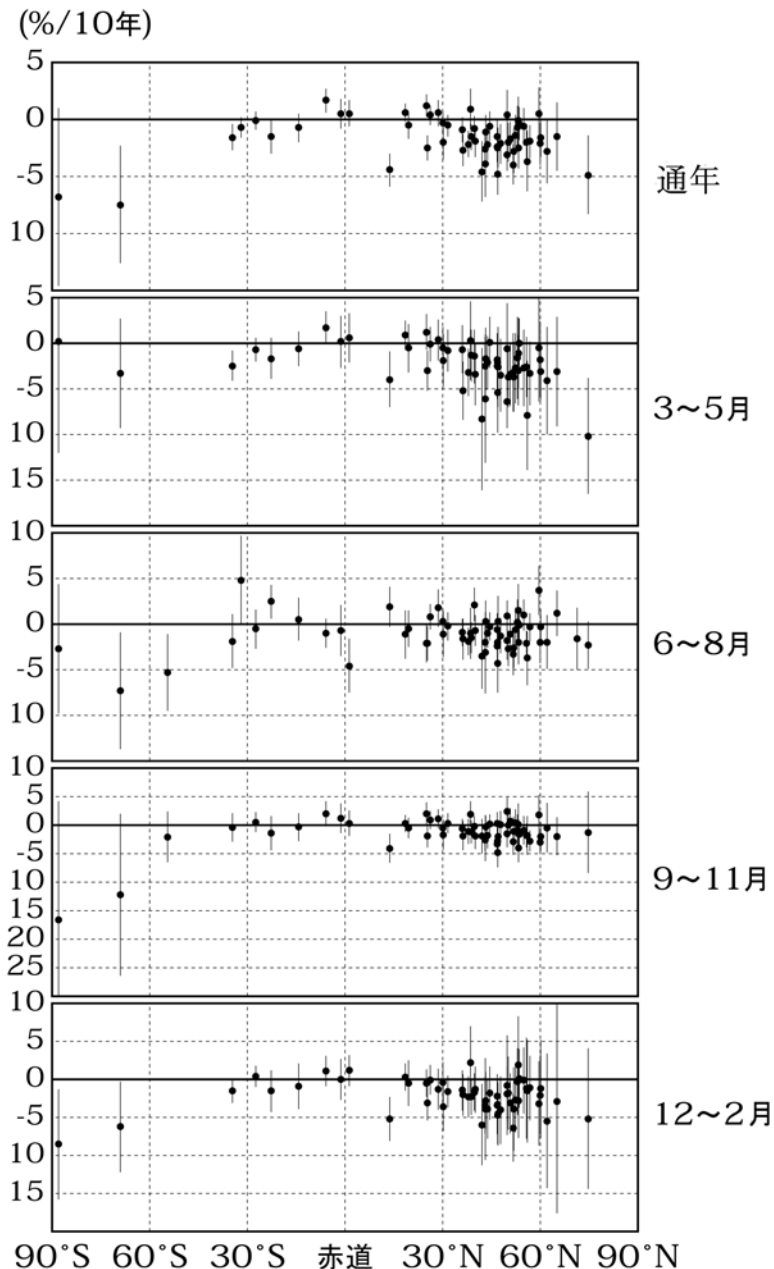


図8 オゾン全量トレンドの緯度分布(1983~2002年;通年)

1983~2002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2002

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南方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1979年から1999年までのトレンド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。

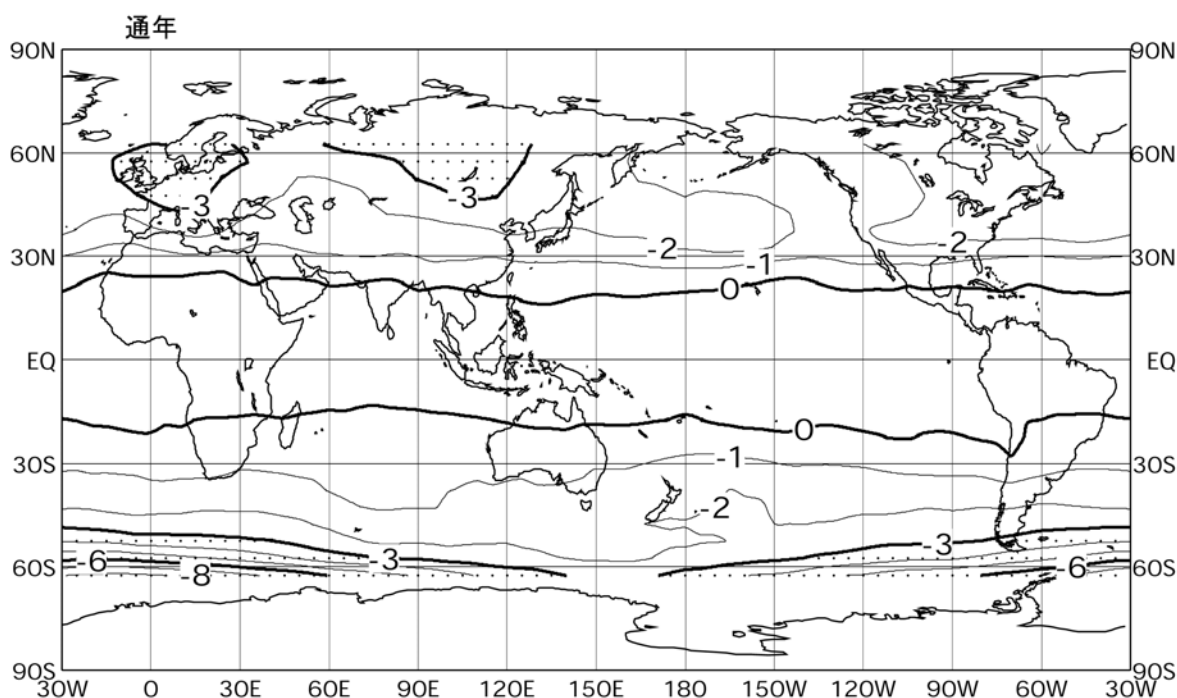


図9 オゾン全量のトレンドの全球分布(1979~2000年;通年)

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、2001年以降の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2002

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。

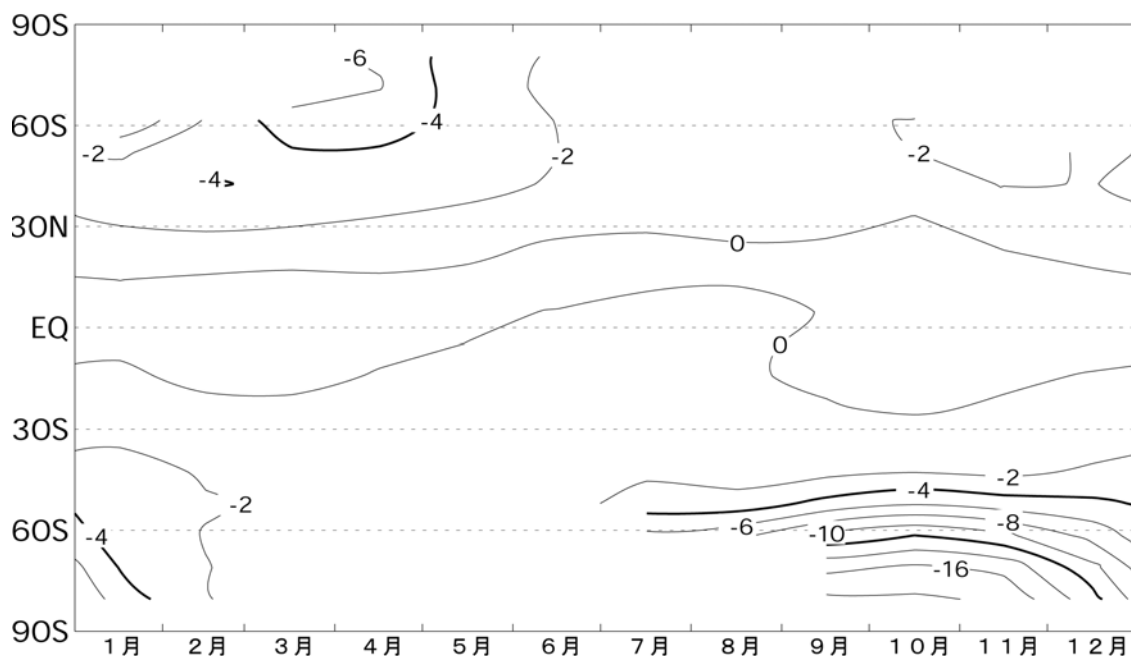


図 10 オゾン全量トレンドの緯度別・月別変化 (1979~2000 年)

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、2001 年以降の 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 2002

(3) オゾンの高度分布のトレンド

図 11 にドブソン分光光度計を用いた反転観測によるオゾンの高度別トレンドを示す。ここではアローザ（スイス、北緯 47 度）、ボールダー（アメリカ、北緯 40 度）、オート・プロバンス（フランス、北緯 44 度）、ベルスク（ポーランド、北緯 52 度）のデータを用いた。これによると、高度 40km の上部成層圏で最も大きな減少が見られ、別に下部成層圏でも大きな減少が見られた。

また、図 12 は、オゾンゾンデ観測の 8 つのデータを統合したオゾン高度別トレンドを示す。これによると、1980～2000 年のオゾントrendは 1980～1996 年のそれよりも減少トレンドが小さく、特に、下部成層圏の高度 12～18km の間で違いが大きい。オゾンの濃度は 1980 年代後半から 1990 年代前半にかけて減少が顕著であるが、1990 年代後半は一定あるいは増大傾向にある。そのため、1997～2000 年のデータを追加することによって線形近似したオゾン減少トレンドは小さくなる。成層圏下部では、1991 年 6 月のピナトゥボ火山噴火の影響等により 1992～1993 年のオゾン濃度の低下が激しい。そのため、その後のオゾンの増大傾向が大きく、1997～2000 年のデータの追加の影響が大きい。

また、図 13 は S A G E の衛星データより求めた、オゾントrend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。

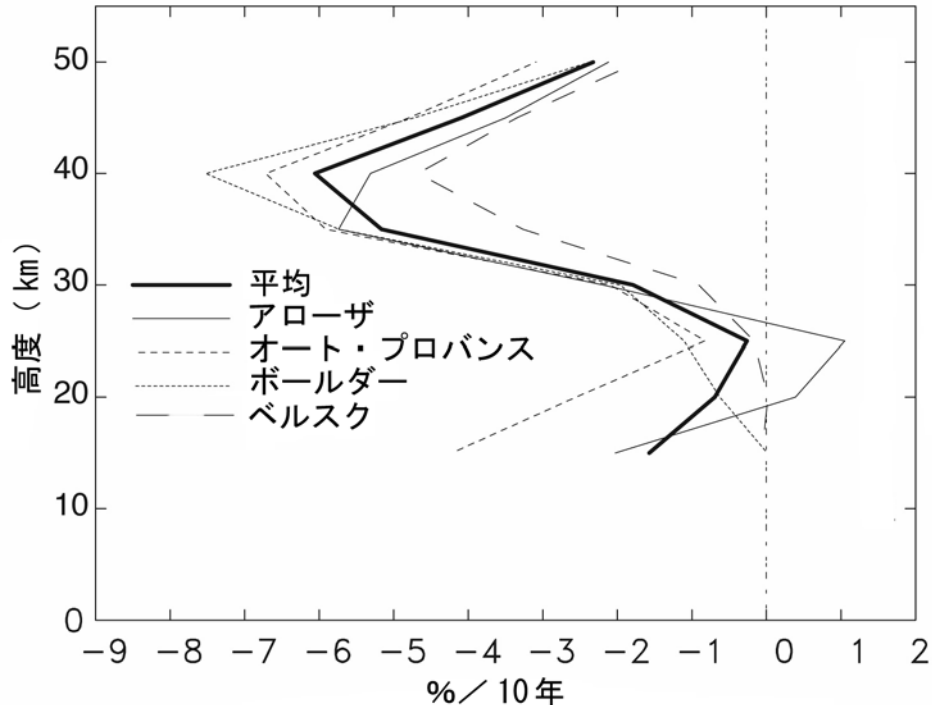


図 11 オゾンの高度別トレンド（1979～1999 年）

太線は 4 カ所の平均トレンドを示す。
(出典) WMO/UNEP 科学パネル報告書（2002 年）

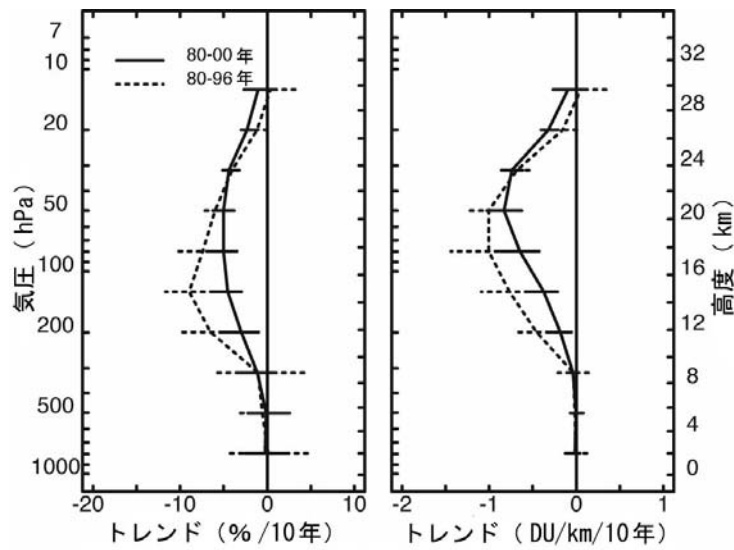


図 12 オゾンゾンデ観測の高度別オゾントレンド

北緯 36 度～59 度に位置する 8 つのオゾンゾンデ観測地のデータ。点線は 1980～1996 年の年平均トレンド、実線は 1980～2000 年の年平均トレンド、横線はそれぞれの標準偏差 (± 2) を示す。左図は%/10 年、右図は DU/km/10 年。

(出典) WMO/UNEP 科学パネル報告書 (2002 年)

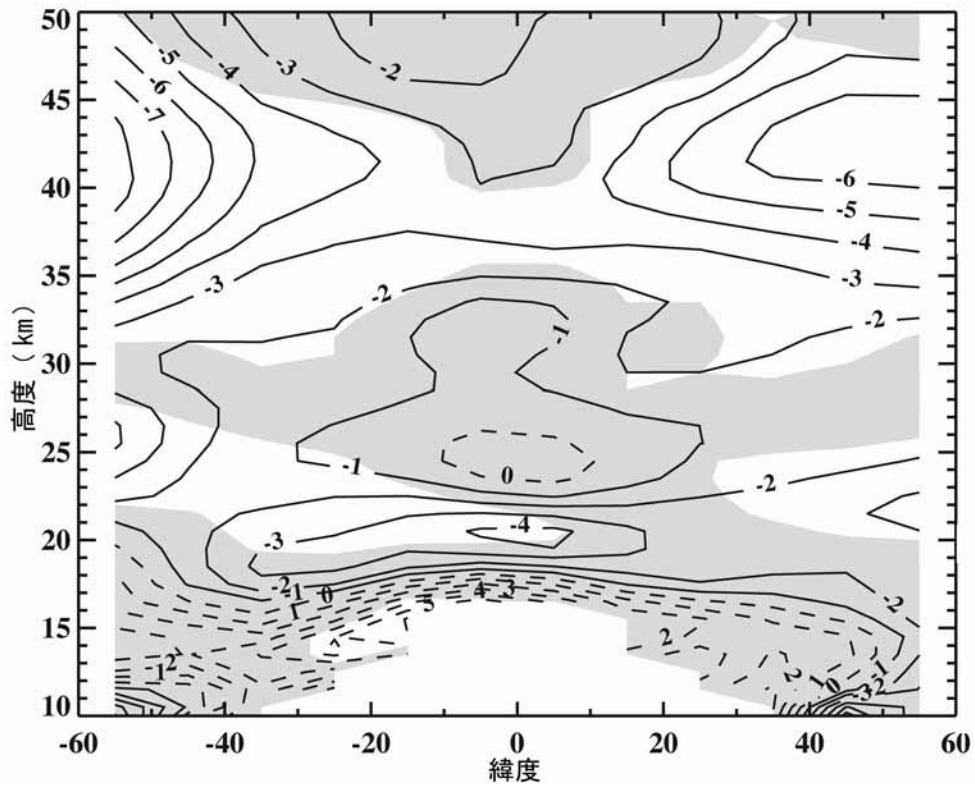


図 13 成層圏オゾントレンドの緯度・高度変化(1984～2000)

1984～2000 年の期間における SAGE - の衛星データによる 10 年当たりの年間トレンド (%/年)。陰影部は、95%の信頼幅で統計的に有意でない範囲である。

(出典) WMO/UNEP 科学パネル報告書 (2002 年)