

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平均値を、同期間のTOMS (p.78表8参照)のデータを基に示す。これをオゾン全量データを見る際の参照値*とする。

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域で多く、特にオホーーツク海上空で最も多い。また、緯度方向におけるオゾン全量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。

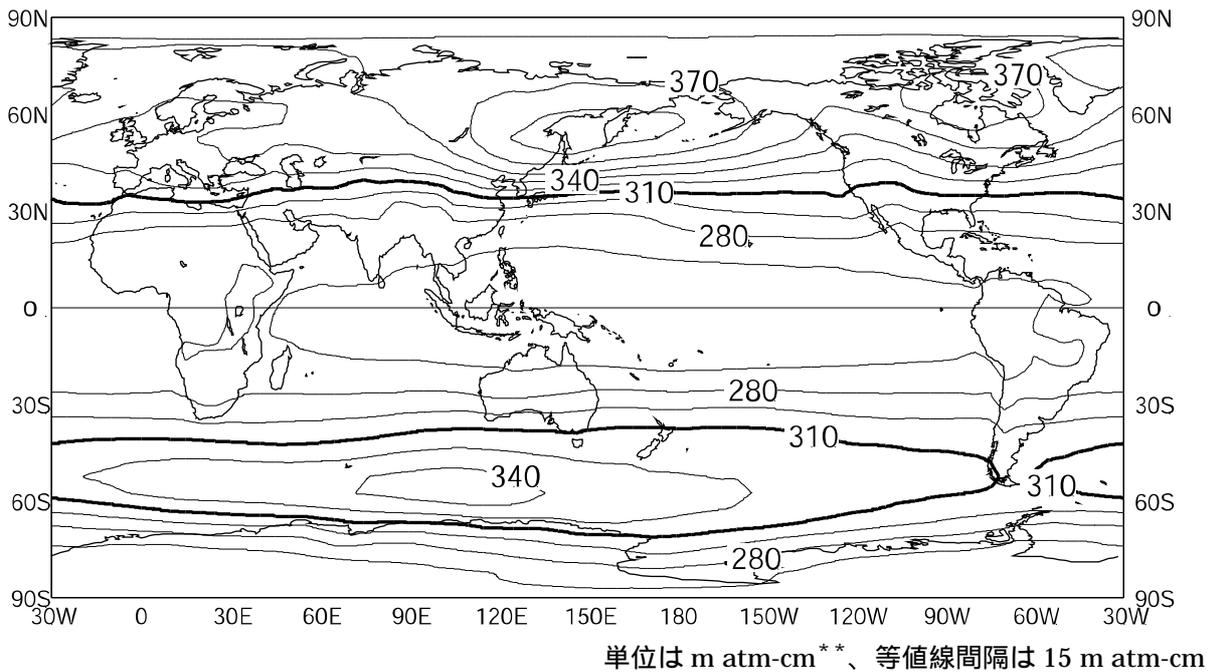


図1 世界のオゾン全量 (1979~1992年の平均)

NASA 提供の TOMS データを基に作成。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2005

* 気象庁では、オゾンの変動を表すための基準として、参照値を定義している。TOMS データに関しては、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) 年の平均値を参照値としている。

** 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の鉛直気柱に含まれるオゾン量をいい、1 m atm-cm は 2.687×10^{20} 分子 \cdot 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 1 気圧に圧縮したとき、3mm の厚みに相当する。

図 2-1、2-2 に、2005 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 OMI** (p.78 表 8 参照) のデータを基に示す。

この図によれば、2005 年のオゾン全量はほぼ 1 年を通して参照値より少なかった。北半球では、高緯度域で 1~3 月に 10%以上少ない領域がみられ、特にグリーンランド付近上空では、2、3 月に 20%以上少なかった。南半球では、オゾンホールが発達に伴って 8~12 月に南極大陸周辺で 10%以上少ない領域がみられ、特に 9、10 月には、アフリカ南方で 30%以上少ない領域が広がった。赤道域では年間を通して少なかった。

* 参照値からの偏差と参照値との比(%)。

** TOMS データは、2002 年以降、中緯度域で負の偏差が拡大し、長期的な変化をみるには適切でない状況となった。TOMS の後継としてオーラ衛星に搭載されている OMI (Ozone Monitoring Instrument) のデータが公開されており、TOMS データと比較して地上観測値との偏差のばらつきが小さいことから、オゾンの長期的な変化をより正確に見積もることができるとして、気象庁では 2005 年 1 月より OMI データを利用することとしている。

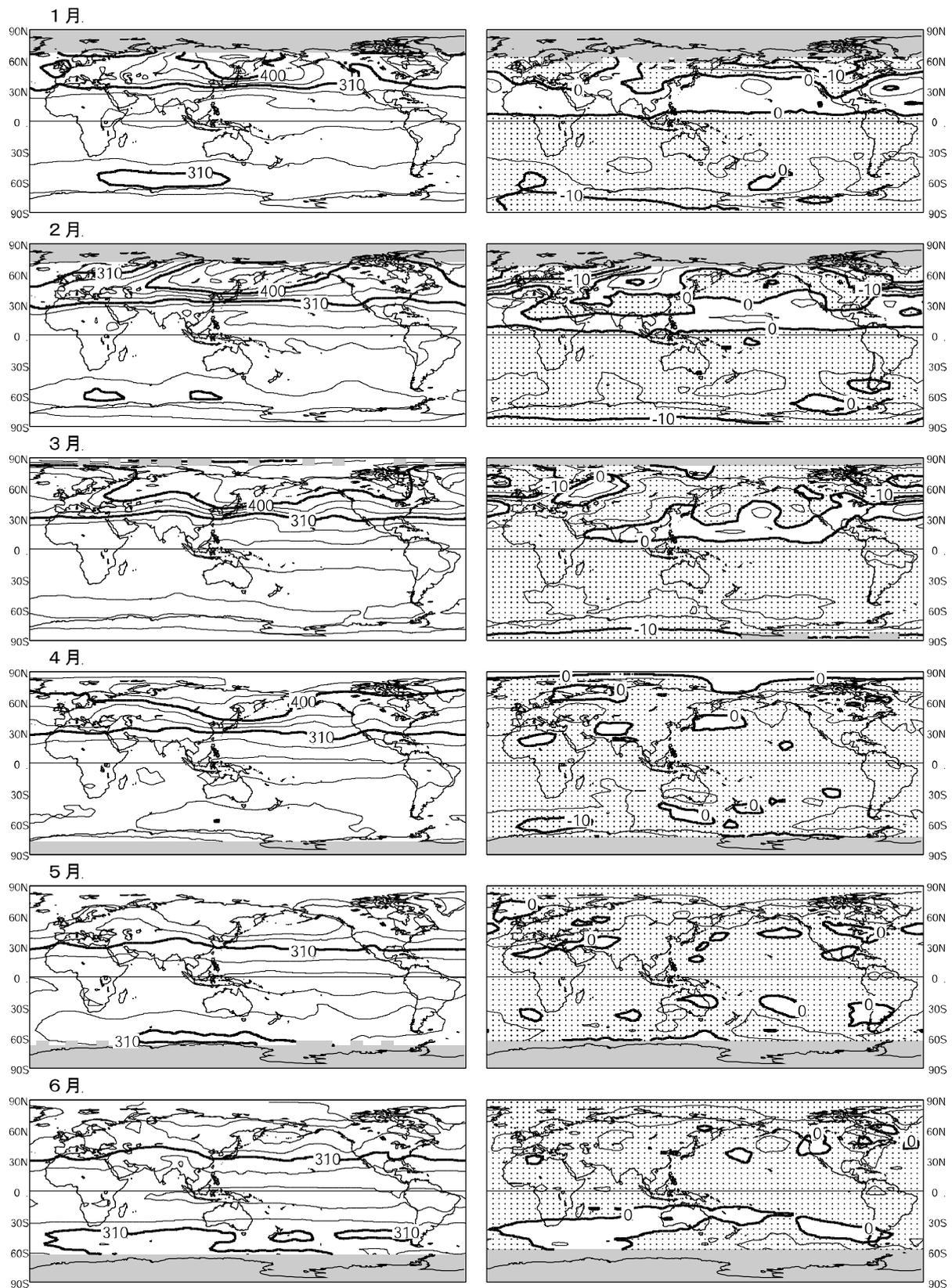


図 2-1 世界の月別平均オゾン全量・比偏差 (2005 年 1~6 月)

等値線間隔は、平均オゾン全量 (左図) については 30 m atm-cm、比偏差 (右図) については 5% 毎。陰影部は太陽高度角の関係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 OMI 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 2005

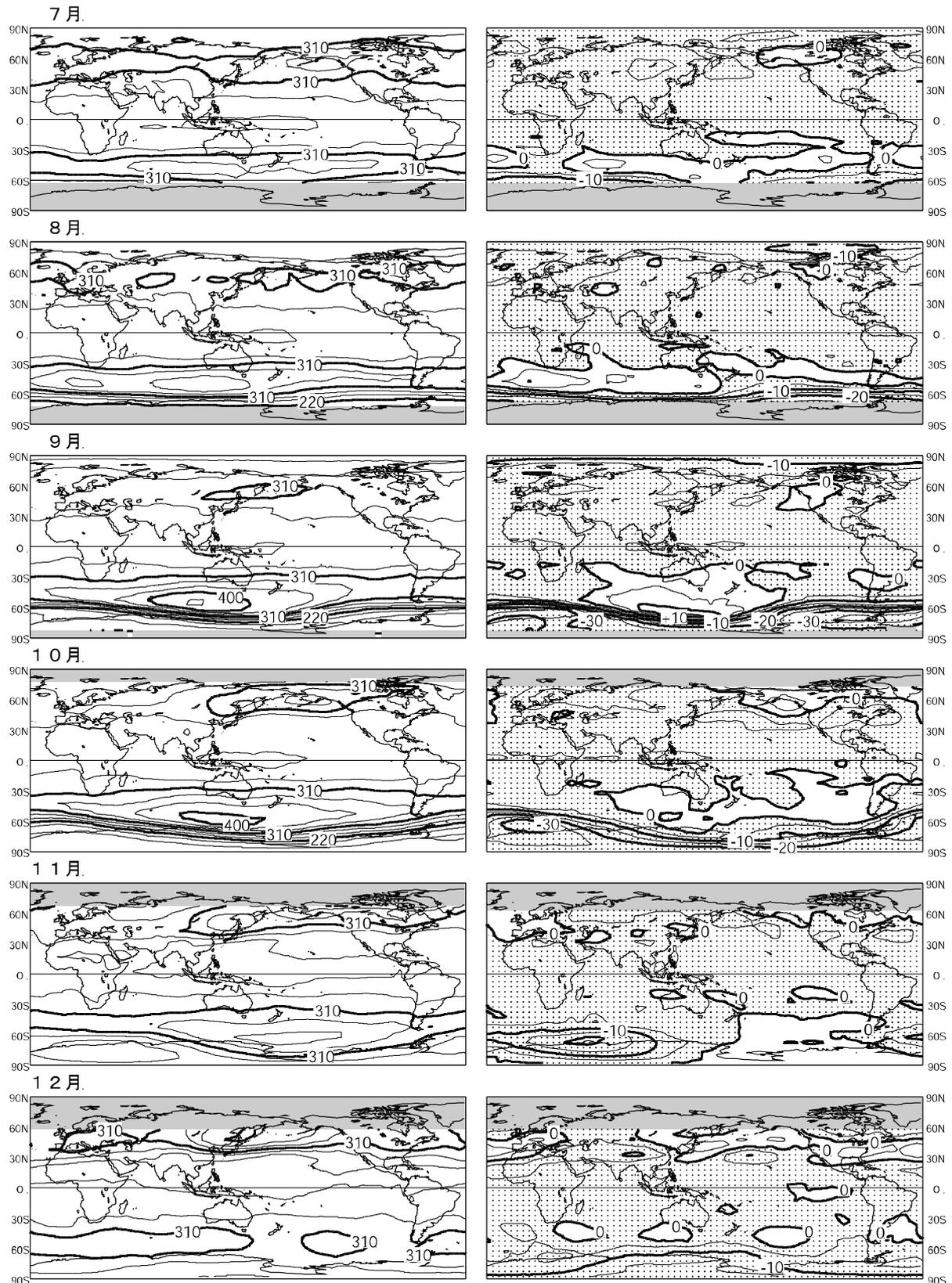


図 2-2 世界の月別平均オゾン全量・比偏差（2005 年 7～12 月）

等値線間隔は、平均オゾン全量（左図）については 30 m atm-cm、比偏差（右図）については 5% 毎。陰影部は太陽高度角の関係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 OMI 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 2005

(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、太陽活動、準2年周期振動(QBO*)等の自然要因に加えて、CFCの放出等の人為的な要因によっても影響を受ける。その中で、季節変動の特徴を見るために、一例として、緯度帯ごとの月別オゾン全量を図3に示す。一般的に中高緯度域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動がみられる。

太陽活動による紫外線量の変動は、光化学反応を通してオゾンの生成・消滅率に影響を与えている。また、QBOはオゾンの輸送に関係する成層圏の大気の循環(プリューワー・ドブソン循環)の強さを変えること等で、オゾン全量の分布を左右する。例えば、赤道上空50hPaでの東西風が東風するとき、熱帯でオゾン全量が減少し、逆に西風するとき、中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)を抽出することができる(図4、5参照)。

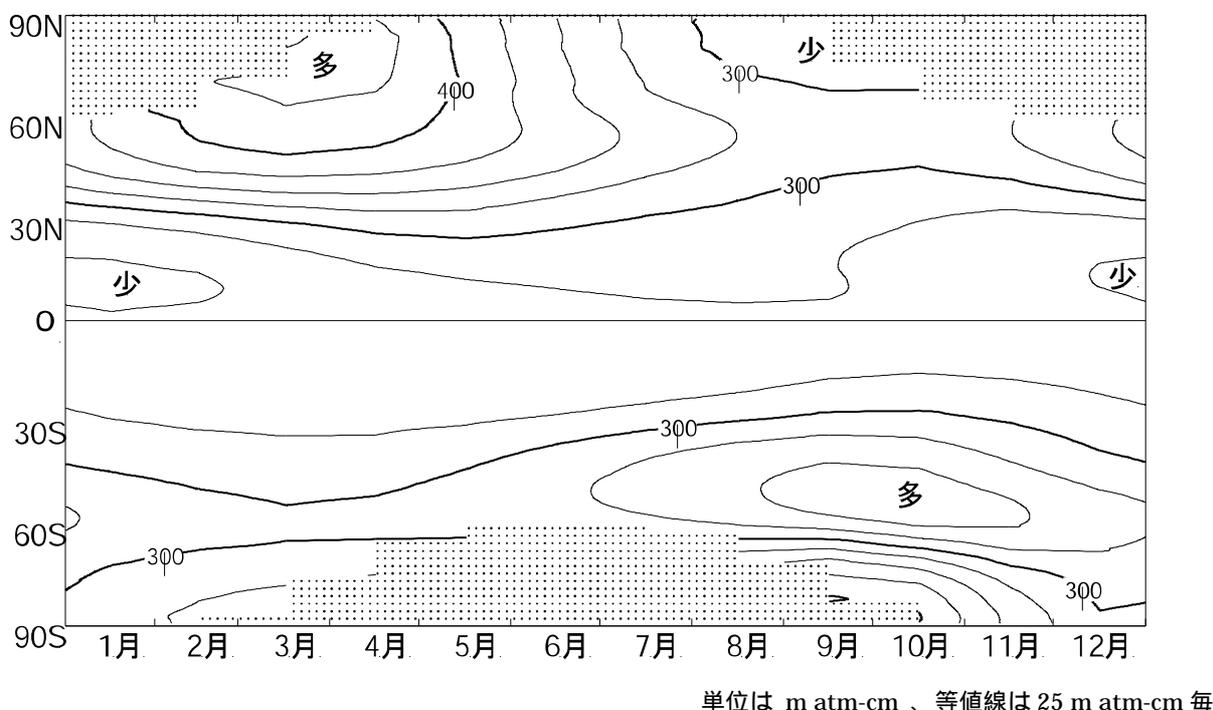


図3 緯度別平均オゾン全量の季節変動(1979~1992年の平均値)

NASA 提供の TOMS データを基に作成。図中、極域での等値線のない点域があるのは、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、太陽光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 2005

* 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。

** 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、季節変動・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。

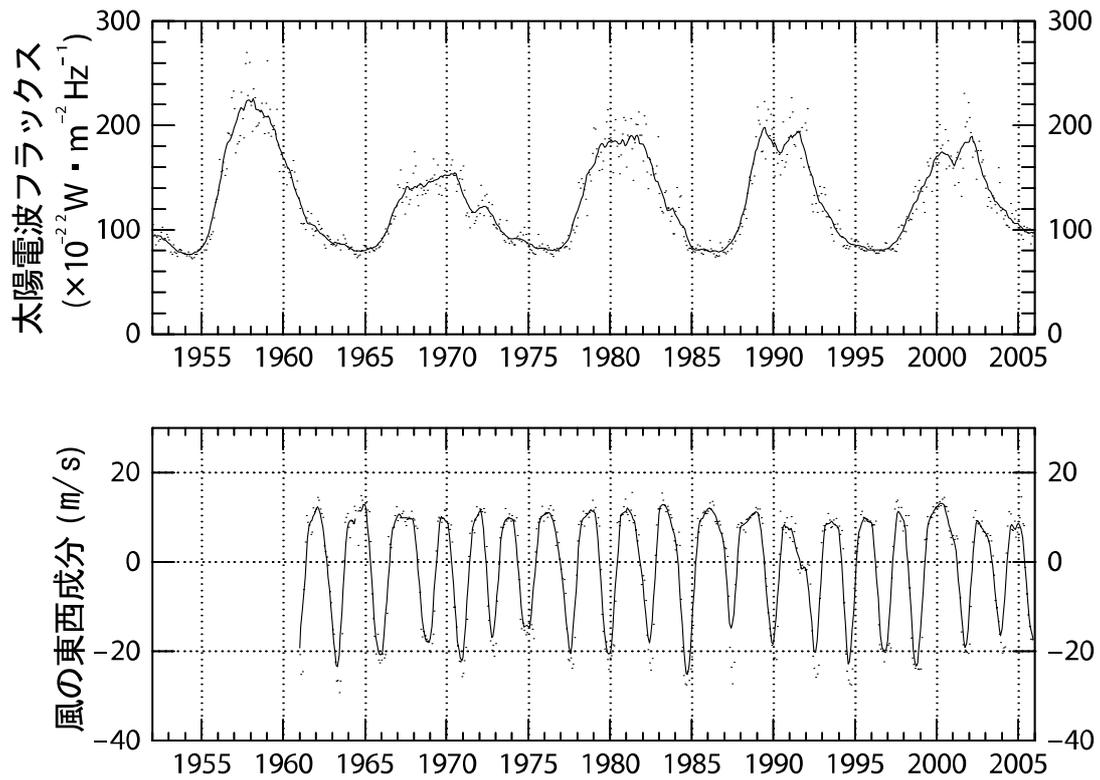


図4 オゾン全量に対する既知の自然変動要因

上段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。下段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。太陽活動の指標としては、長期にわたり安定したデータの得られる太陽電波フラックスが一般的に使われる。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2005

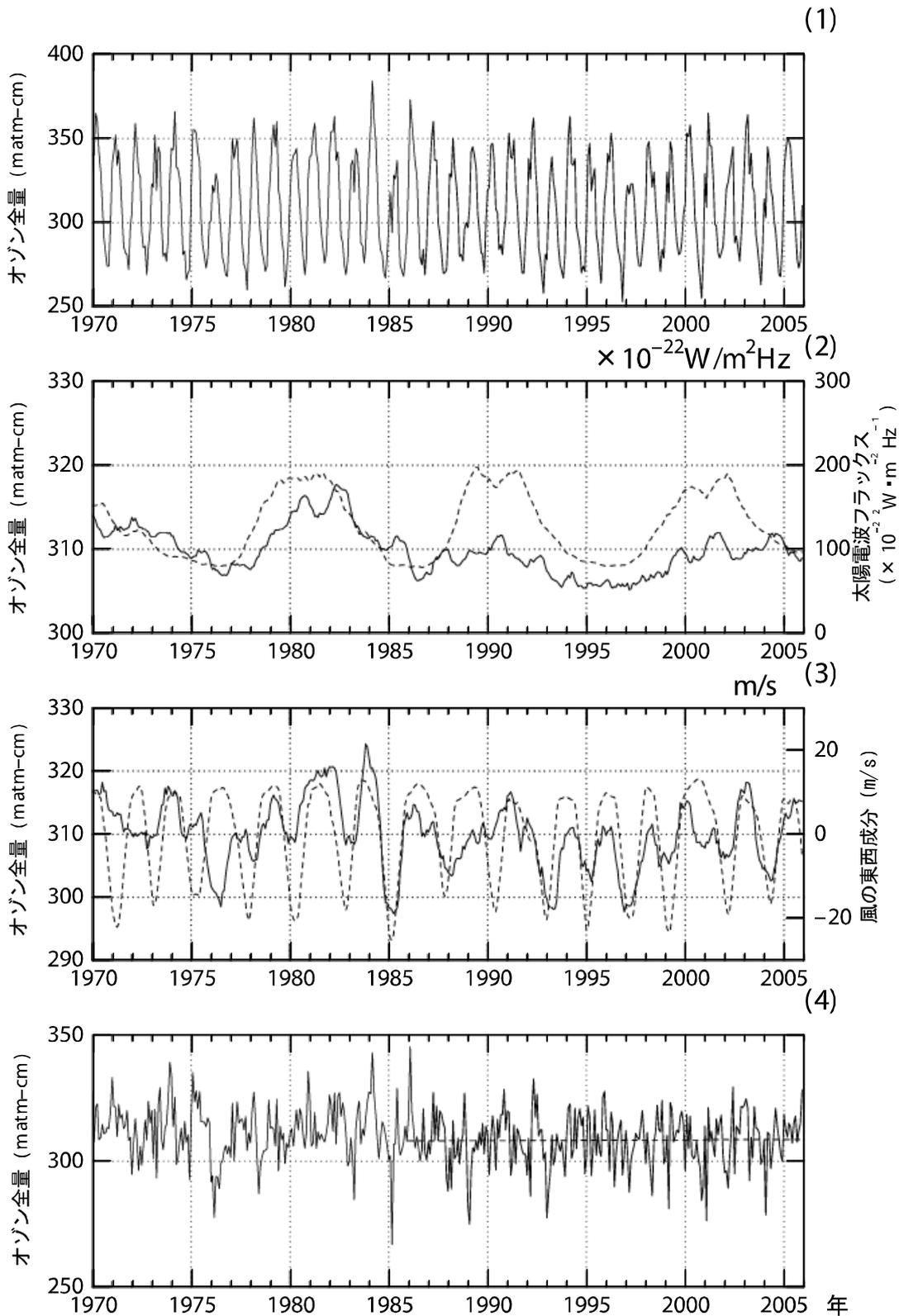


図5 つくばにおけるオゾン全量トレンドの解析例

(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:5ヶ月ずらして表示)、(4)季節変動、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2005

イ．全球的なオゾン全量トレンド

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評価パネルは、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た。1991 年、1994 年及び 1998 年には、その時点で利用可能な最新データを加え、再度トレンドの解析を行った。さらに、科学評価パネルは、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 1990 年代後半（1997～2001 年）の平均オゾン全量の変化を示す。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みられない。北半球中緯度域と南半球中緯度域ではそれぞれ 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の減少が比較的大きいものに対して、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* から 1990 年代後半（1997 - 2001）のオゾン全量の減少**

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

* 1964-1980 年の平均値

** 季節変動、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。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 (WMO, 2003)

2002 年の科学評価パネル以降に得られたデータを加え、地上及び衛星からの観測によるオゾン全量から季節変動、太陽活動、QBO の影響を除去した値について、1970 年から 1980 年の平均値に対する比偏差を図 6 に示す。これによると、オゾン全量は 1980 年代から 1990 年代前半にかけて全球的に大きく減少しており、現在も減少した状態が続いている。地上からの観測結果によれば、1996 年から 2005 年の平均オゾン全量は、1980 年以前と比較すると、全球平均で 4.0%減少している。したがって、オゾン全量及びオゾン高度分布のトレンド解析*において示されたオゾンの減少傾向は、周期性のある既知の自然変動要因のみからは説明できず、CFC 等の大気中濃度の増加が主要因であると考えられる。特に 1980 年代以降の南極域上空のオゾンホールの発達**は、大気中の CFC 等の濃度増加によると考えることが最も妥当である。

上述の地上からの観測結果によれば、1990 年から 2005 年の平均オゾン全量は、1980 年以前と比較すると、南半球では 4.8%、北半球で 3.3%減少しており、オゾン全量の減少量は南北両半球で異なっている。さらに、1990 年代以降のトレンドをみると、南半球では、年々の変動は大きいものの減少した状態が概ね同じ程度で続いている。一方、北半球では、ピナトゥボ火山噴火(1991 年 6 月)の影響でオゾン破壊が促進され、一時的な極小を示した 1993 年以降は、ほとんど一定かわずかに上昇に転じたように見える。図には示さないが、この上昇傾向は北半球の中・高緯度で顕著である。

成層圏のオゾンが生成される低緯度域から中・高緯度域へ運ぶ循環の強さを示す指標に着目した解析によると、循環の強さは、1980 年代から 1990 年代前半にかけてオゾンの輸送を弱める方向に変化し、その後は強める方向に変化した。また、長期にわたって解析された気温や循環の全球分布を入力したモデル計算によると、循環の強さの変化によって 1980 年代は北半球中緯度のオゾンに減少傾向が表れ、1990 年代半ば以降は増加傾向が示された。これらのことから、1980 年代の減少傾向には一部循環の変化も寄与していたこと、また、1990 年代半ば以降、北半球のオゾン全量にみられるほとんど一定もしくは緩やかな増加傾向には、力学的な要因が大きく寄与しているものと考えられる。北半球でのオゾン全量にみられる傾向には、このような自然要因の影響が考えられ、また、成層圏の塩素量は、現在、ピークを過ぎたとしてもその減少量はわずかであるため、塩素量の減少に伴ってオゾン全量が増加に転じたとみることはできない。

* オゾン高度分布のトレンド解析については、第 2 部 1 オゾンの高度分布のトレンド (p.22) 参照。

** 南極域上空のオゾンホールの発達については第 2 部 2 南極域上空のオゾン層の状況 (p.24) 参照。

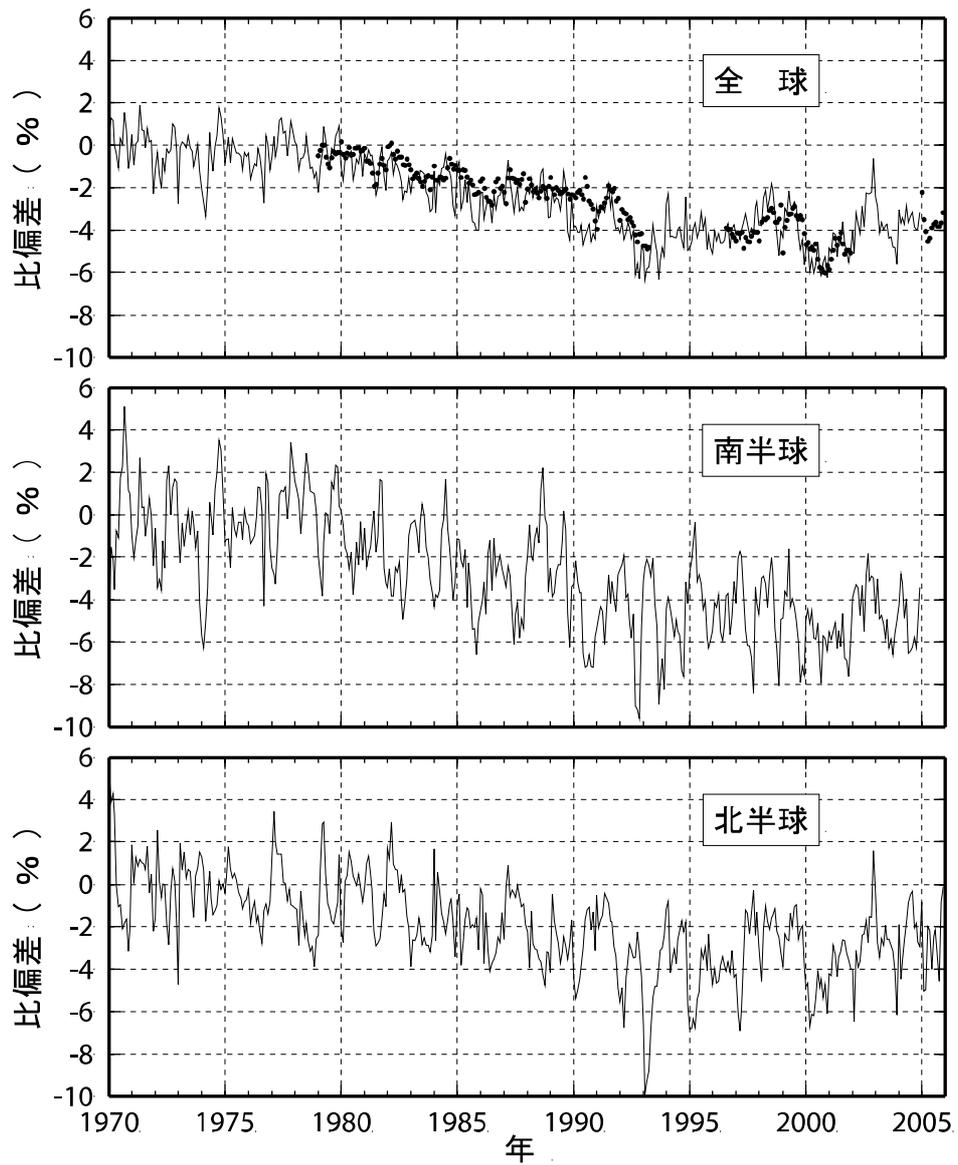


図6 世界のオゾン全量比偏差の推移

実線は、世界の地上観測地点におけるオゾン全量の1970～1980年の平均値に対する比偏差。季節変動、太陽活動、QBOの影響を除去している。上段から全球（北緯70度～南緯70度）、南半球及び北半球のオゾン全量の変化を示す。は衛星観測データによる比偏差。

（出典）気象庁 オゾン層観測報告2005

図 7 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 1979 年以降のオゾン全量トレンドの緯度分布を示す。1979 年以降のトレンドでは、通年及び各季節とも低緯度域を除いて多くの地点で減少傾向となっている。特に北半球の北緯 30 度以北では通年及び 3~5 月、12~2 月に有意な減少を示している地点が多い。南半球高緯度域（南緯 60 度以南）の 9~11 月は南極オゾンホール出現に伴い、10%/10 年を超える減少を示している。これらの解析結果から、1979 年以降のオゾン全量トレンドは、低緯度域を除いて明らかな減少を示しているといえる。

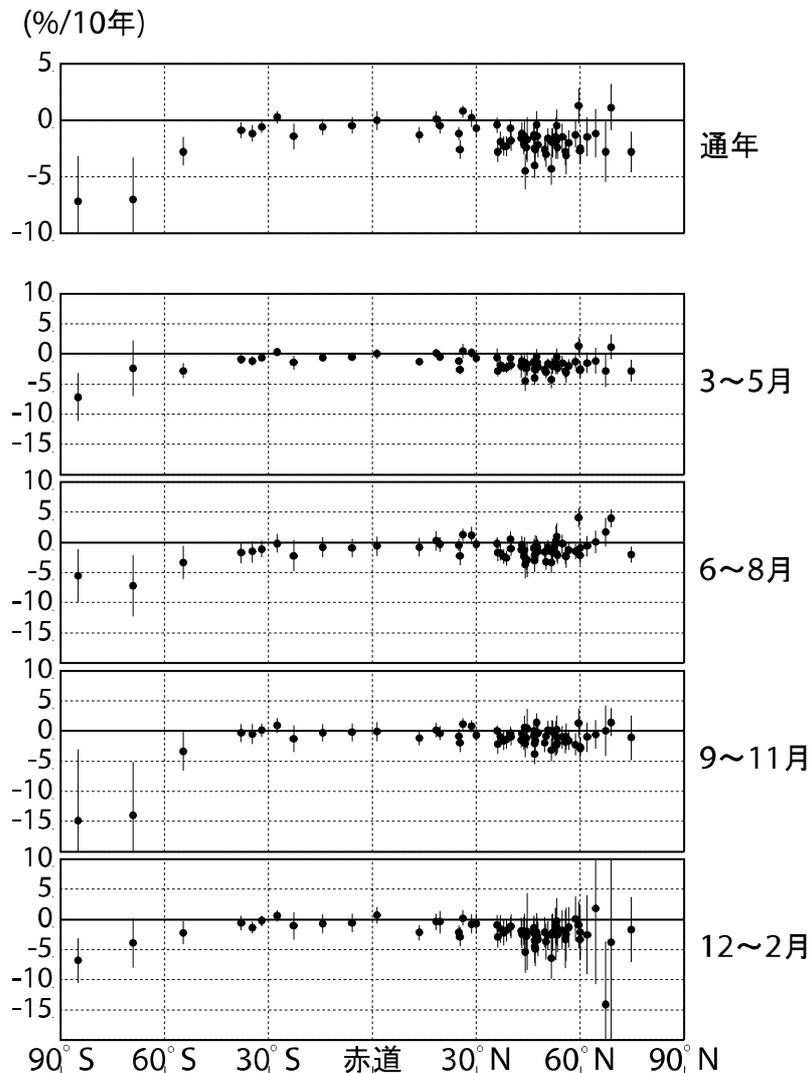


図 7 オゾン全量トレンドの緯度分布 (1979~2005 年)

1979~2005 年の観測地点 (65 地点) における、季節変動、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 2005

図 8 に 1979 年 1 月から 2005 年 12 月までの TOMS 及び OMI 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。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 度帯付近ではヨーロッパ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。

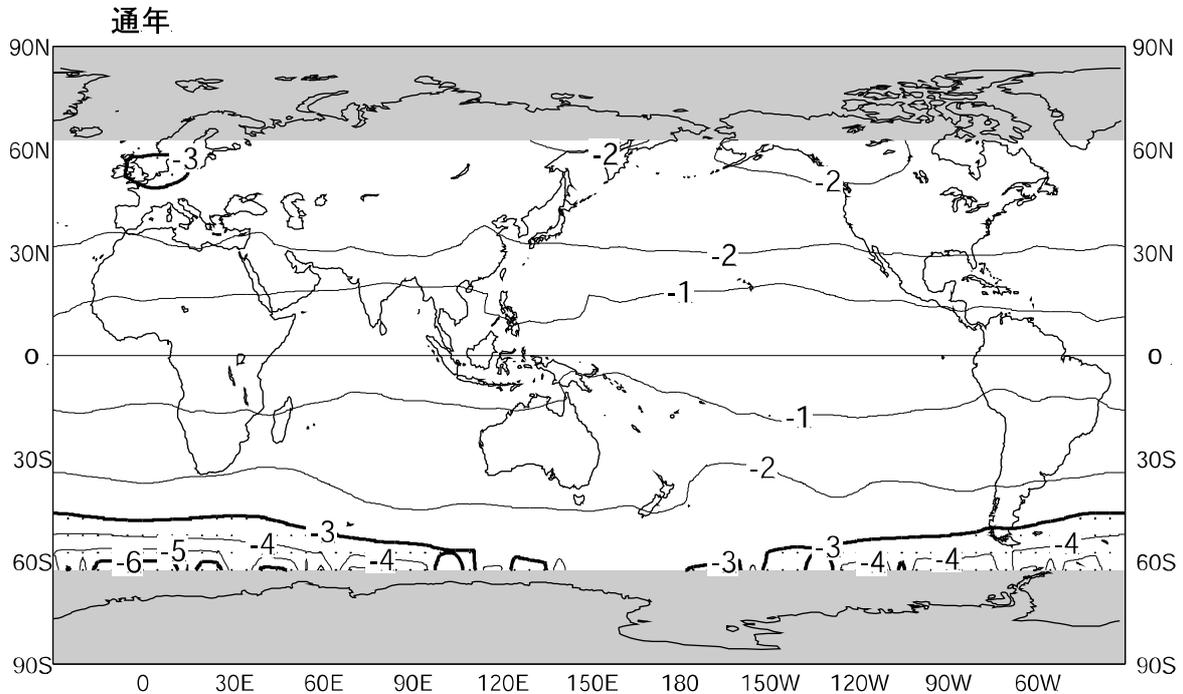


図 8 オゾン全量トレンドの全球分布 (1979~2005 年)

NASA 提供の TOMS 及び OMI データを基に作成。格子点 (5° メッシュ) ごとの月平均オゾン全量時系列から季節変動、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、点域は -3%/10 年を超える領域。なお、陰影部により示した両極域については、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。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2005

図 9 に緯度別・月別のオゾン全量トレンドを示す。北半球及び南半球中緯度域においては図 7 とほぼ同様のトレンドを示しているが、両半球高緯度域の春季に特に顕著な減少傾向があることが分かる。これは冬季の低温条件下で塩素や臭素がオゾンを破壊しやすい物質となって蓄積され、太陽光の照射を受ける春季に特にオゾン層破壊を進行させるためと考えられる。*

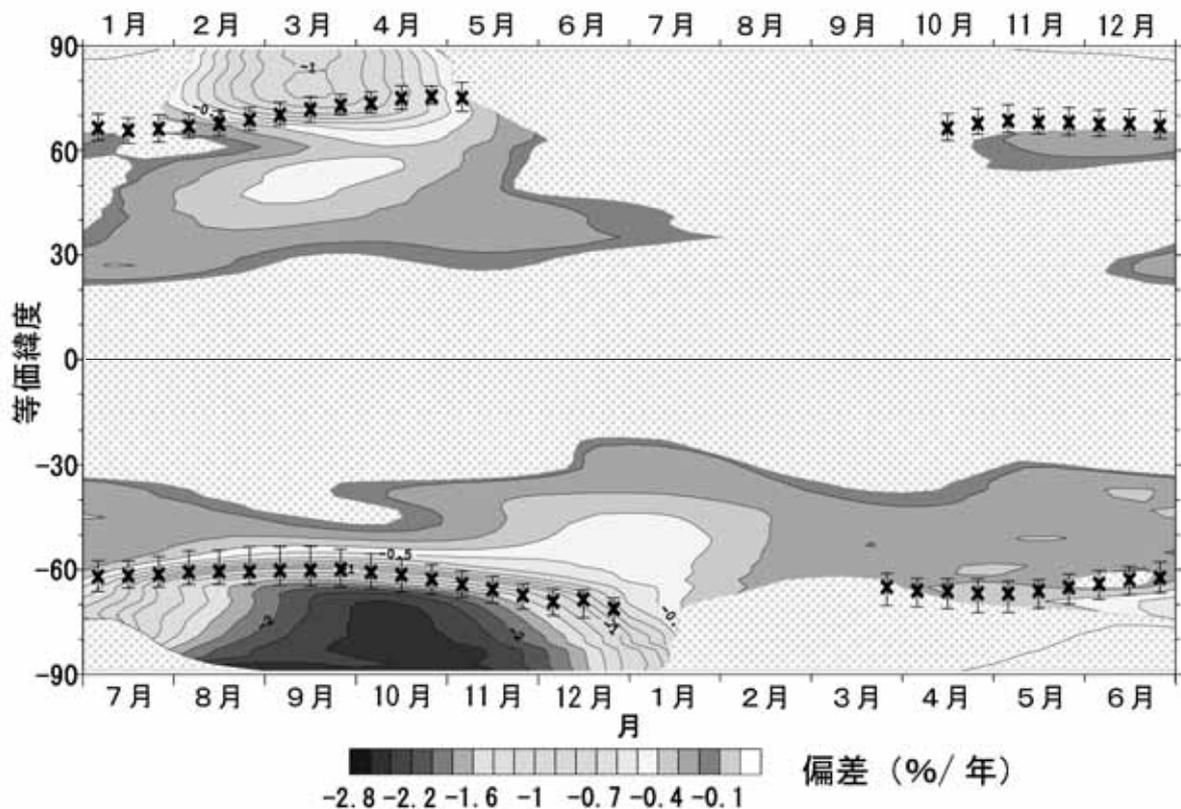


図 9 緯度別・月別オゾン全量トレンド (1978 年 11 月 ~ 2000 年 12 月) **

TOMS と GOME データによる等価緯度***及び月別のオゾン全量トレンド。網かけの部分は統計的に有意ではない領域 (95%信頼幅)。×は極渦境界の平均位置、縦線はその変動幅。北半球と南半球の季節を揃えるため、月を 6 ヶ月ずらして表示している。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion:2002 (WMO, 2003)

* オゾン層破壊のメカニズムについては第 3 部参考資料 オゾン層破壊のメカニズム (p.105) 参照。

** 巻頭口絵に掲載

*** 成層圏において極域のオゾン層破壊は極渦 (p.24 脚注参照) の内側で起こるが、通常、極渦の中心は地理上の極点からずれており、極渦も円形ではない。従って、「等価緯度」という極渦に沿った「緯度」を用いて緯度別に平均することによって、地理的な緯度を用いた場合と異なり、オゾン層破壊が起こっている領域とそうでない領域を明瞭に分離してトレンド解析を行うことができる。

(3) オゾンの高度分布のトレンド

図 10 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、さらに下部成層圏でも大きな減少が見られた。

図 11 には、オゾンゾンデ観測の 8 つのデータを統合したオゾンの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率が小さく、特に、下部成層圏の高度 12~18km の間で違いが大きい。これは、オゾン全量が 1980 年代を中心に減少が進み、1990 年代半ば以降は一定あるいは増大傾向にあるため、1997~2000 年のデータを追加することによって、線形近似した際のオゾンの減少率は小さくなることによるものである。特に、下部成層圏では、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く、その後のオゾンの増大傾向が顕著なため、1997~2000 年のデータの追加によるオゾンの減少率への影響が大きくなっている。

また、図 12 に SAGE 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。中高緯度域の高度 40km 付近で減少傾向が大きい。

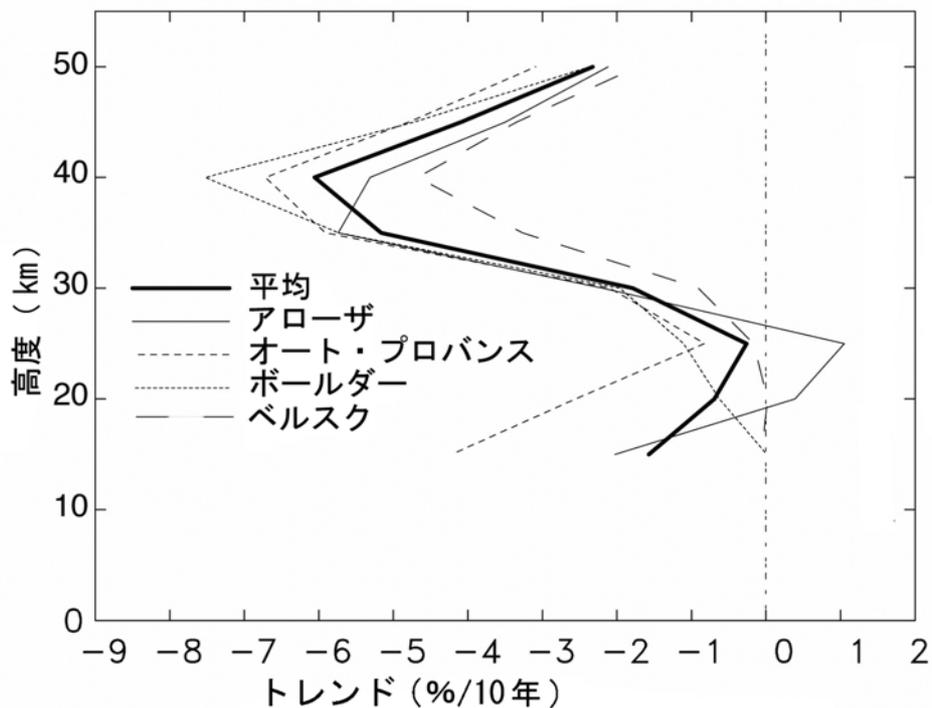


図 10 オゾンの高度別トレンド (1979~1999 年)

太線は 4 カ所の平均トレンドを示す。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 (WMO, 2003)

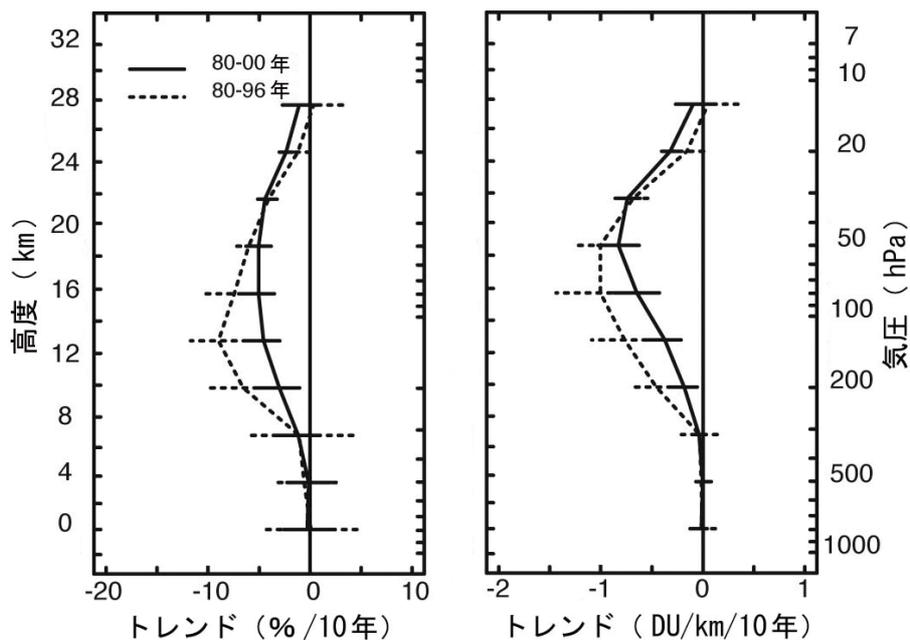


図 11 オゾンゾンデ観測の高度別オゾントレンド

北緯 36 度 ~ 59 度に位置する 8 つのオゾンゾンデ観測地の統合データ。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) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 (WMO, 2003)

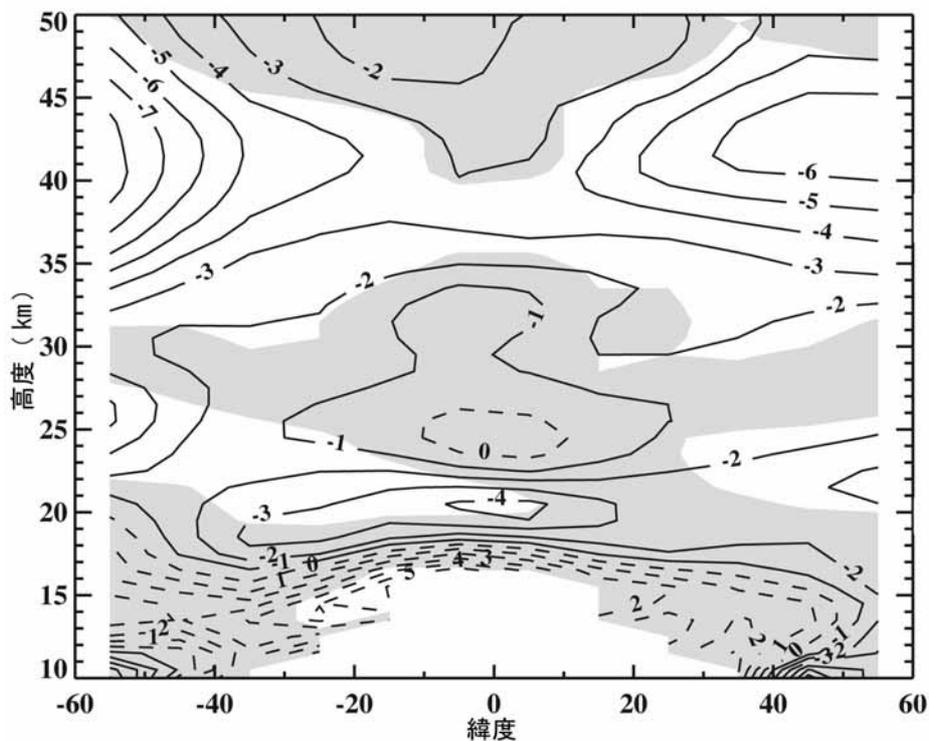


図 12 成層圏オゾントレンドの緯度・高度変化(1984 ~ 2000)

SAGE の衛星データによる 1984 年 ~ 2000 年の年平均トレンド (%/10 年)。陰影部は 95% の信頼幅で統計的に有意でない領域。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 (WMO, 2003)