

## 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.80表7参照)のデータを基に示す。これをTOMSによる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。

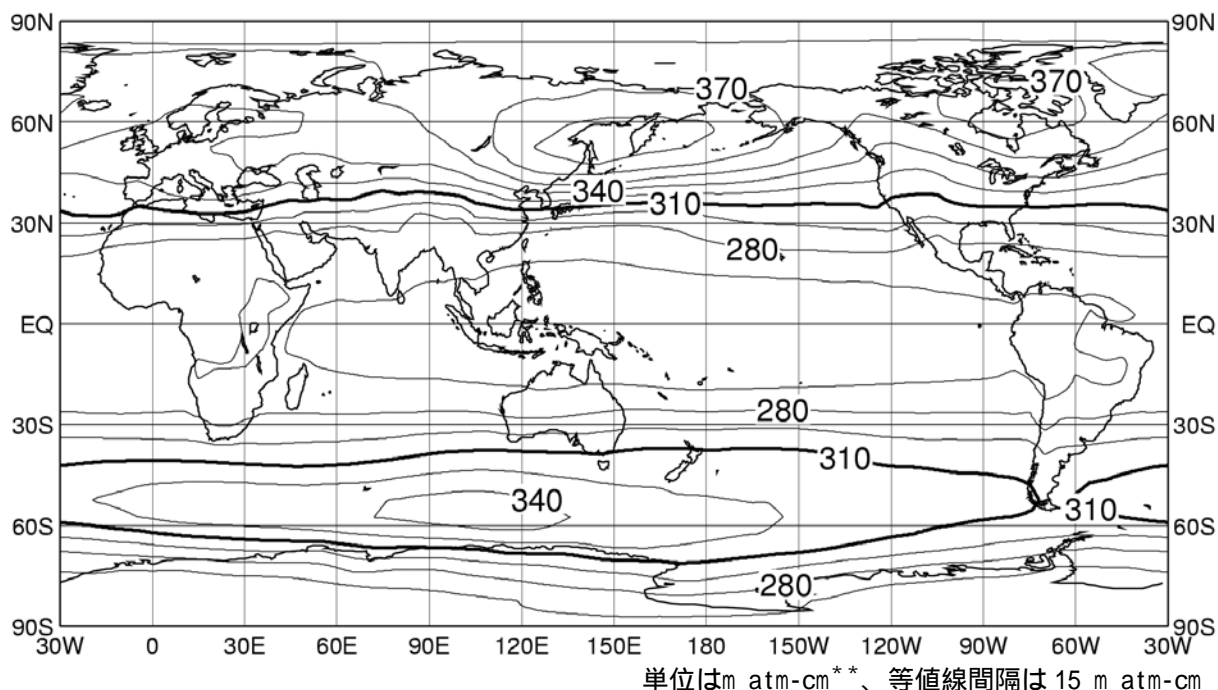


図1 世界のオゾン全量 (1979~1992年の平均)

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2004

\* 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。

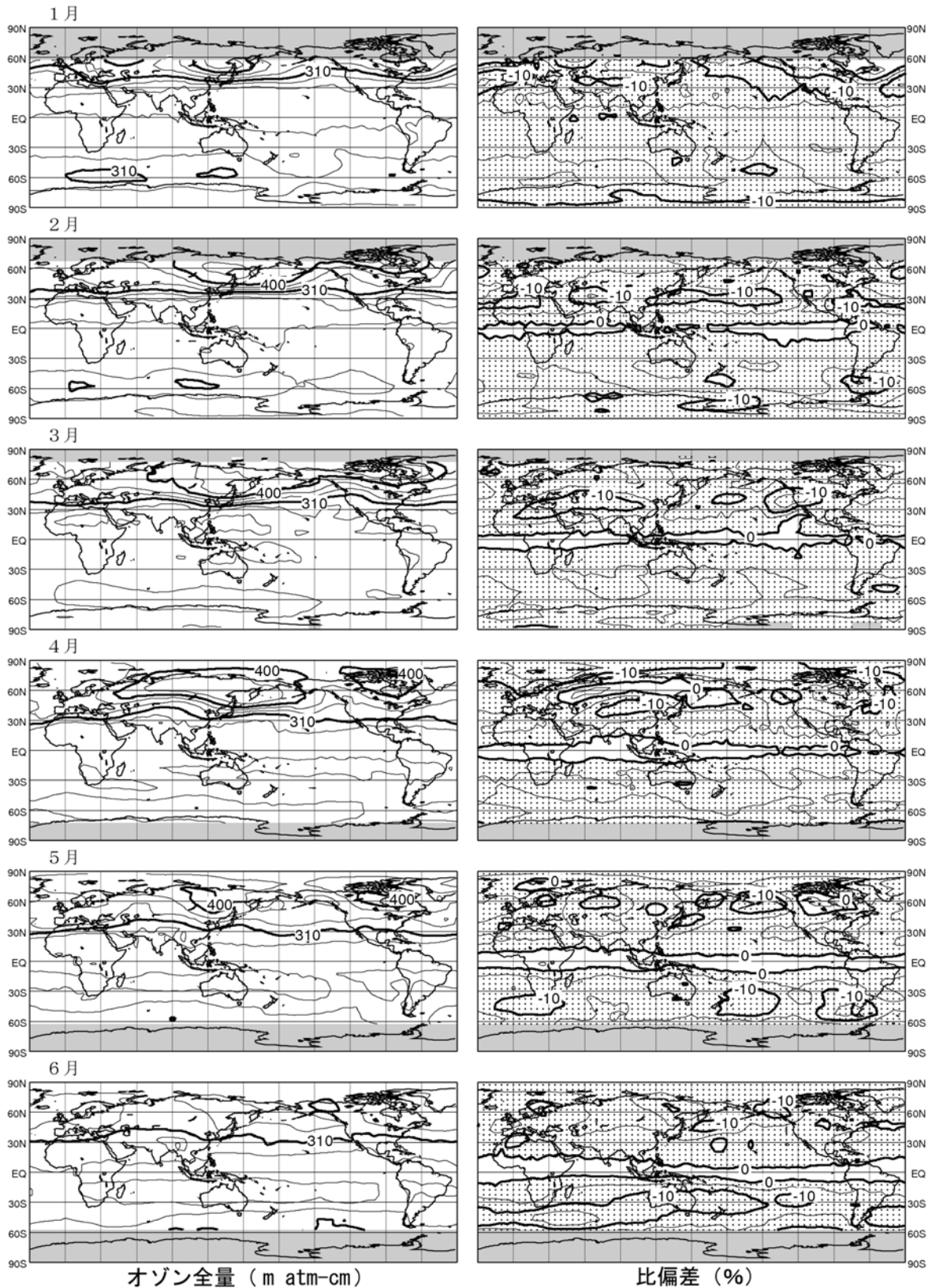
\*\*  $\text{m atm-cm}$  (ミリアトモスフェアセンチメートル) : オゾン全量を表す単位。DU (ドブソン単位)ともいう。オゾン全量とは大気鉛直気柱に含まれるオゾン量をいい、 $1 \text{ m atm-cm}$ は $2.687 \times 10^{20}$ 分子 $\cdot \text{m}^{-2}$ に等しい。 $300 \text{ m atm-cm}$ は、この気柱の中の全てのオゾンをも、 $0.1$ 気圧に圧縮したとき、 $3 \text{ mm}$ の厚みに相当する。

図 2 - 1、2 - 2 に、2004 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<sup>\*</sup>を TOMS のデータを基に示す。

この図によれば、2004 年のオゾン全量は、北半球では、グリーンランドから北欧、シベリア上空にかけての高緯度域で、4、9、10 月に大きな負偏差領域が見られた。北太平洋からアラスカにかけての地域で、1～6、8～11 月に大きな負偏差領域が見られた。北大西洋の中緯度域で、1～2、4、10～12 月に大きな負偏差領域が見られた。アジアからアフリカにかけての中緯度域で、1～4 月に大きな負偏差領域が見られた。南半球では、南太平洋、インド洋の中緯度域で、5～10 月に大きな負偏差領域が見られた。南極大陸を含む高緯度域では 8～12 月に大きな負偏差領域が見られたが、特に 9～11 月にはオゾンホール<sup>1</sup>の発達に伴ってオゾンが大きく減少した。

---

\* 参照値からの偏差と参照値との比(%)。



オゾン全量 (m atm-cm)

比偏差 (%)

図2-1 世界の月別平均オゾン全量・比偏差 (2004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2004

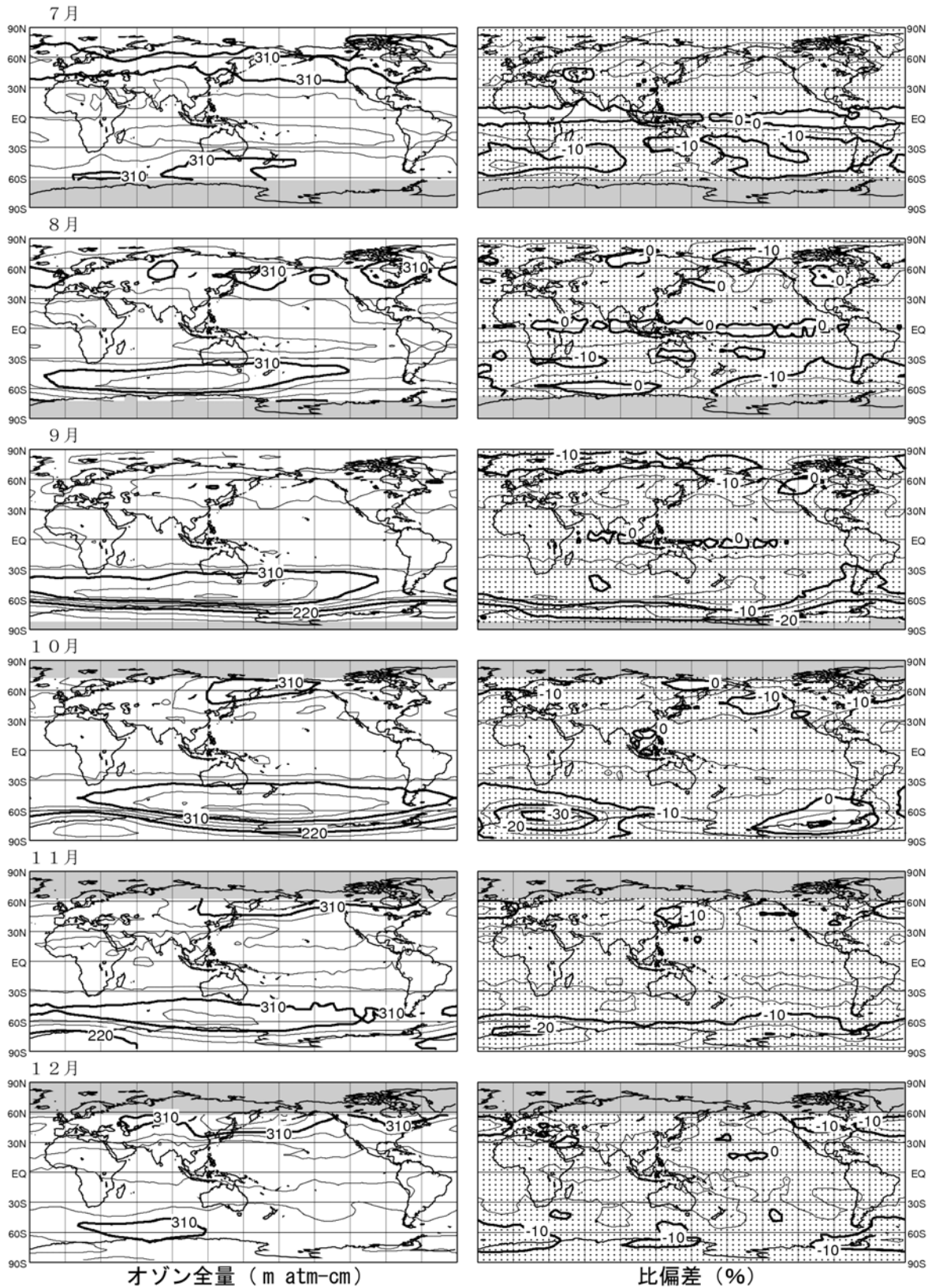


図 2 - 2 世界の月別平均オゾン全量・比偏差 (2004 年 7 ~ 12 月)

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 2004

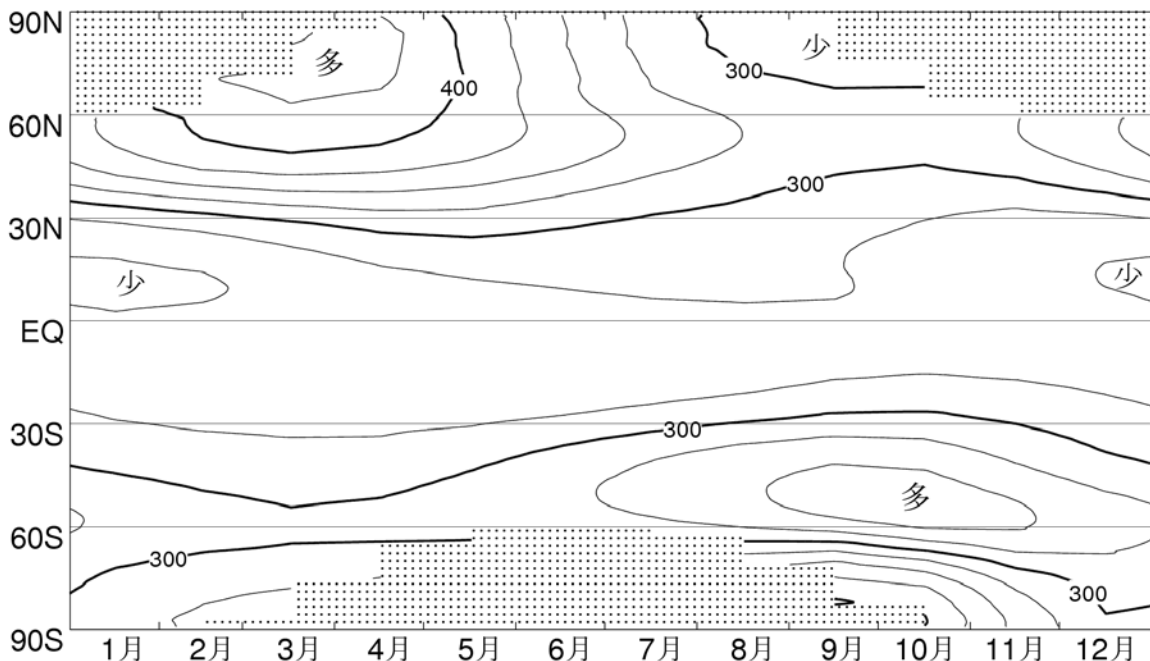
## (2) オゾン全量のトレンド

### 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)。



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 2004

\* 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。

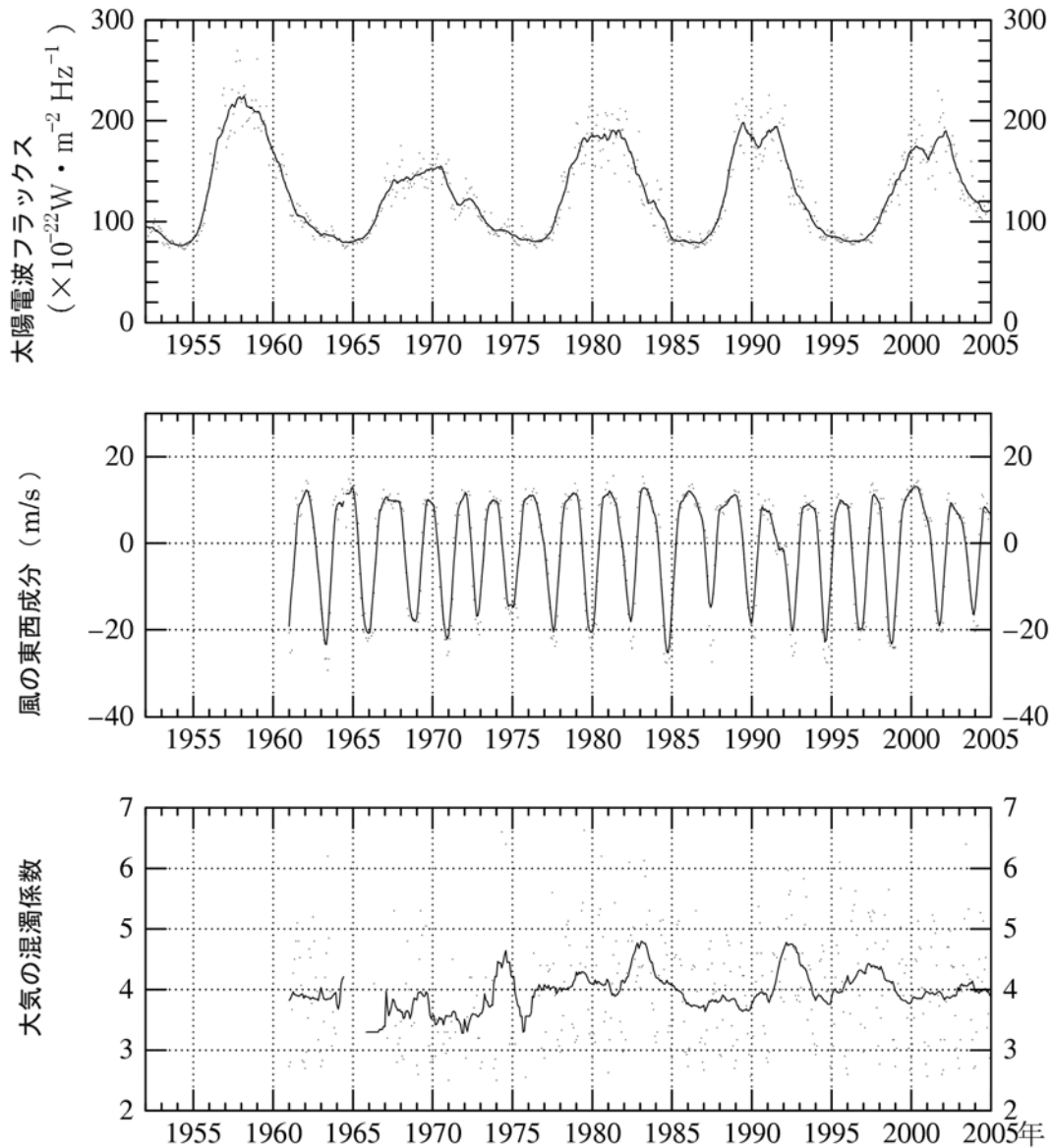


図4 オゾン量に対する既知の自然変動要因

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。中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。下段はつくばにおける直達日射から評価した大気の混濁係数で、実線は13ヶ月移動平均値。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 2004



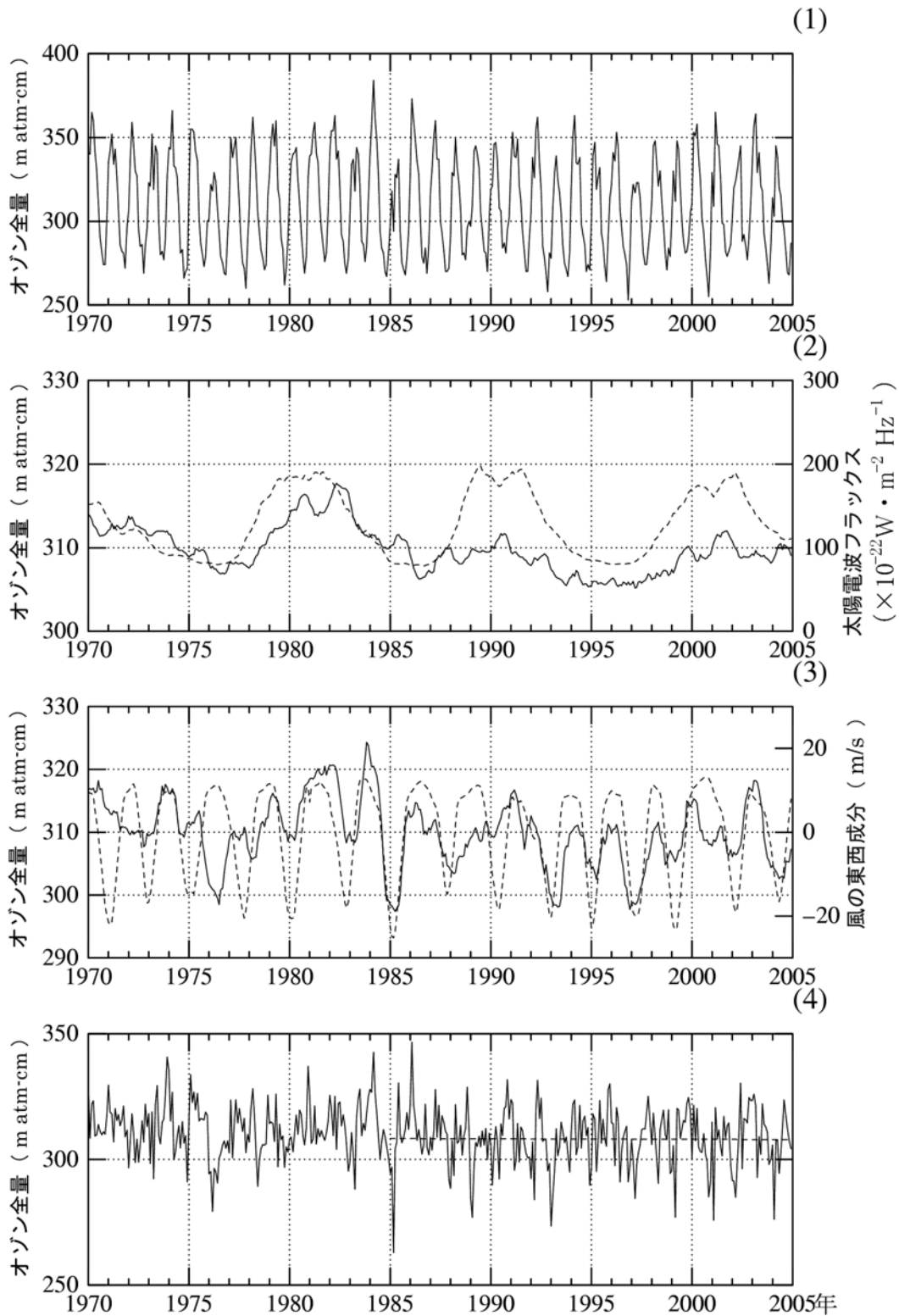


図5 つくばにおけるオゾン全量トレンドの解析例

(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 2004

## イ．U N E P 科学評価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)と比較した最近5年間(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見られない。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\*から最近5年間(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变化。

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

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、さらに、1992～1993年には過去最小のオゾン全量（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（フィリピン）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にオゾン全量の季節別推移を示す。これによると、北半球中緯度域では特に冬・春季に年毎の変動幅が大きく、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。南半球中緯度域は、北半球中緯度域に比べて、季節による偏差の違いは少ない。このように、ピナトゥボ火山噴火後のオゾンの減少は、北半球では冬・春を中心に顕著であったのに比べ、南半球では明瞭でなかったという違いが見られる。こうした両半球の間の違いはモデル計算でも再現されておらず、その原因は明らかでない。

さらに、図8に高度約22kmにおける緯度別・季節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。

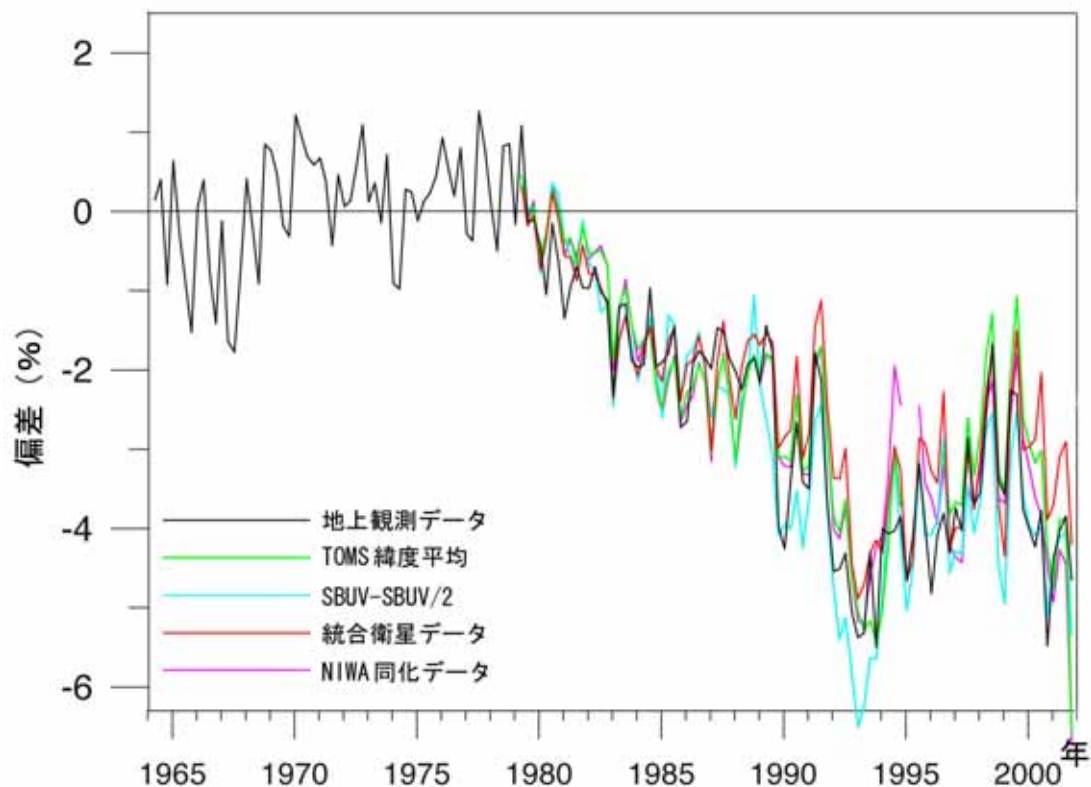


図6 全球のオゾン全量の変化\*\*

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。季節変動、太陽活動及びQBOによる変動成分を除去してある。

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

\* ピナトゥボ火山の噴火によるオゾン全量への影響については第3部参考資料 オゾン層破壊のメカニズム (p.101) 参照

\*\* 巻頭口絵に掲載

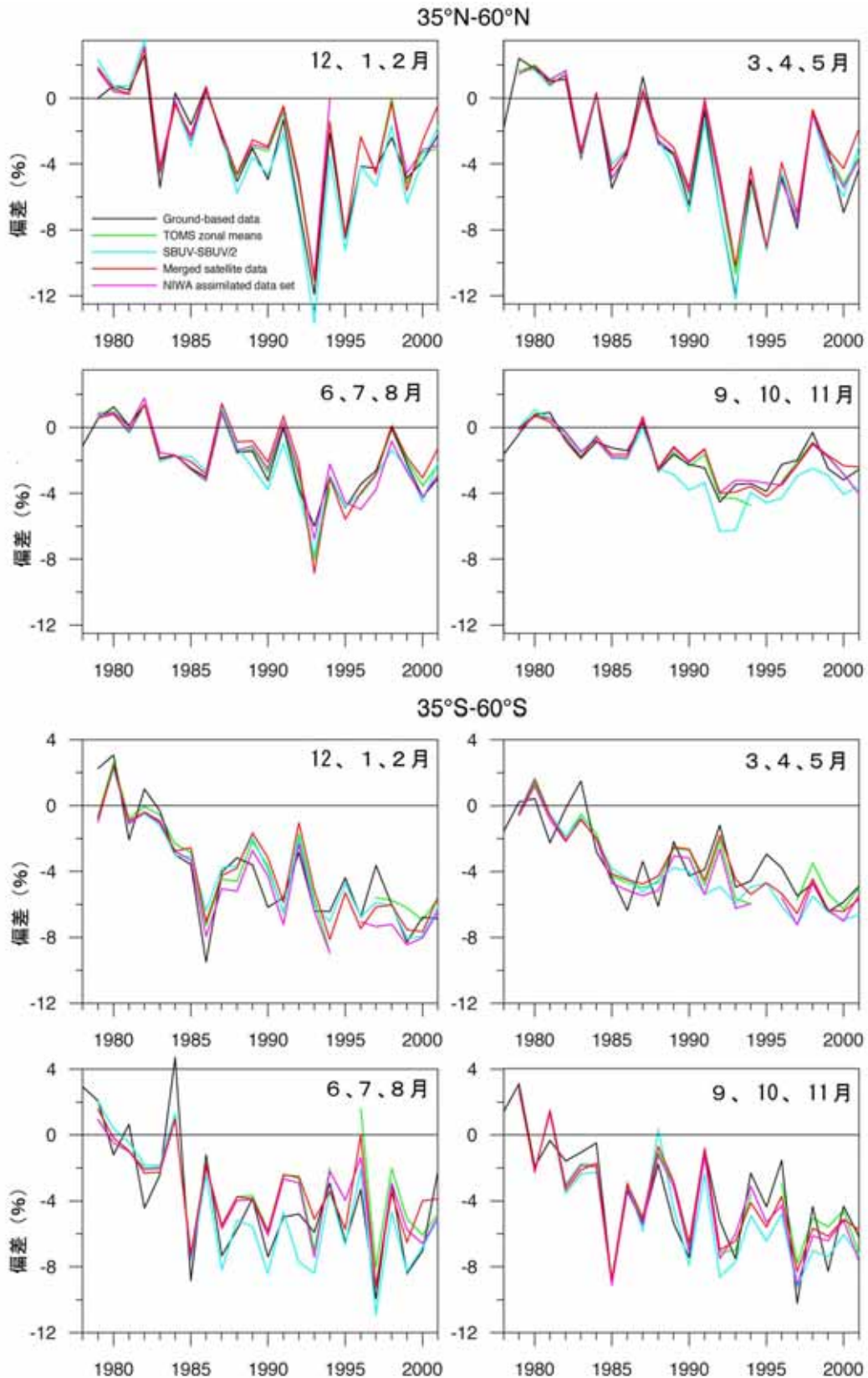


図7 緯度別・季節別オゾン全量の推移

北緯 35～60 度（上図）及び、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、統合衛星データ及びNIWA 同化データセットを示す。

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

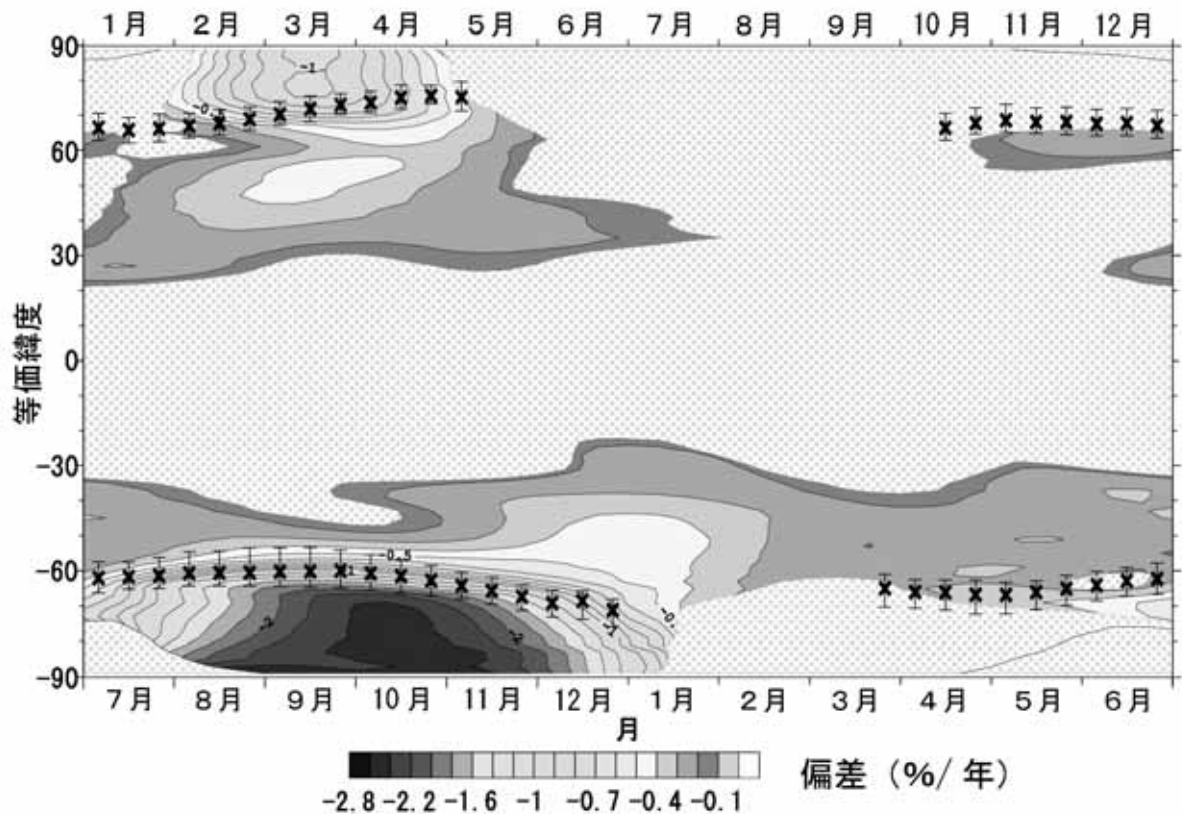


図8 高度約22kmにおける緯度別・季節別オゾン全量トレンド(1978年11月~2000年12月)\*  
 TOMSとGOMEデータによる等価緯度\*\*及び季節別のオゾン全量トレンド。網かけの部分は統計的に有意ではない領域(95%信頼幅)。×は極渦境界の平均位置、縦線はその変動幅。北半球と南半球の季節を揃えるため、月を6ヶ月ずらして表示している。  
 (出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion:2002 (WMO, 2003)

\* 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、オゾン層破壊が起き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。

### ウ．我が国での解析結果

図9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（1985～2004年）のオゾン全量トレンドの緯度分布を示す。過去20年間のトレンドでは、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、過去20年間のオゾン全量のトレンドは、低緯度域を除いて明らかな減少を示しているといえる。

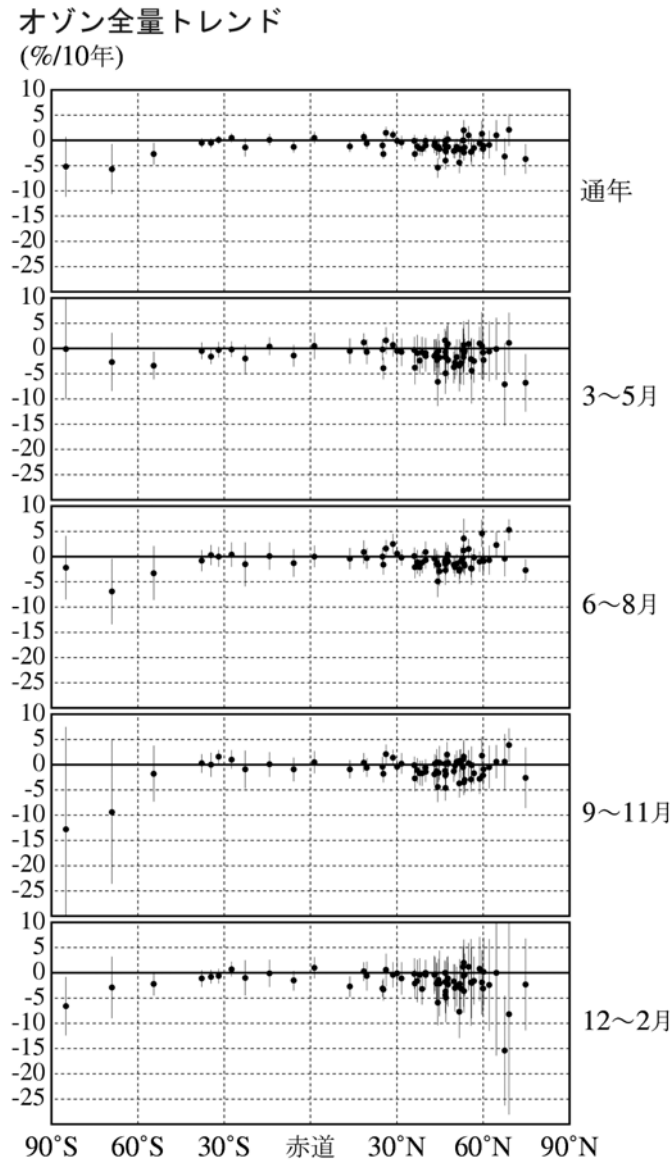


図9 オゾン全量トレンドの緯度分布（1985～2004年）

1985～2004年の観測地点（66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2004

図 10 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。点域は変化率が  $-3\%$  / 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。

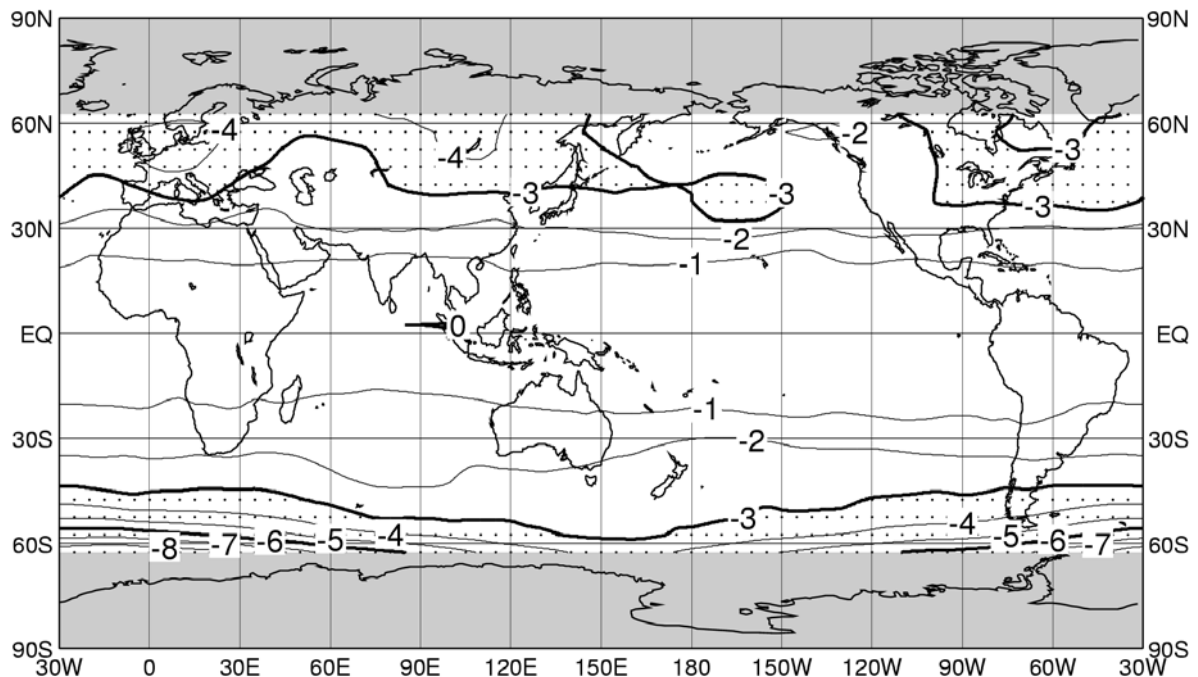


図 10 オゾン全量のトレンドの全球分布 (1979~2000 年)

NASA 提供の TOMS データを基に作成。格子点 ( $5^\circ$  メッシュ) ごとのオゾン全量時系列に季節変動、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、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 は 2002 年頃から観測装置に起因する誤差 (主に光学系の特性変化) が大きくなったため、NASA によってデータの見直しが行われ、最近のデータはトレンド解析には使用できないと発表されている。そこで、トレンドの全球分布については、図 11 に示す MOD データ\* による解析結果と若干異なる可能性があることに留意しつつ、2000 年までの TOMS データを用いた結果を示す。

(出典) 気象庁 オゾン層観測報告 2004

\* MOD データ (Merged Ozone Data) : TOMS と SBUV の衛星データを融合させて作成したデータセット。TOMS データと比較して地上観測値との偏差のばらつきがやや小さく、TOMS では一部のデータが得られていない期間についても MOD データは SBUV / 2 データを利用してデータを揃えていることから、オゾンの変化をより正確に見積もることができると考えられる。ただし、2001 年以降については、地上観測値に対する比偏差が正となっており、ばらつきも大きいいため、さらにデータの検証が必要である。

図 11 に図 10 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。高緯度域の冬季から春季にかけてオゾンの減少傾向が顕著であるのは、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。\*

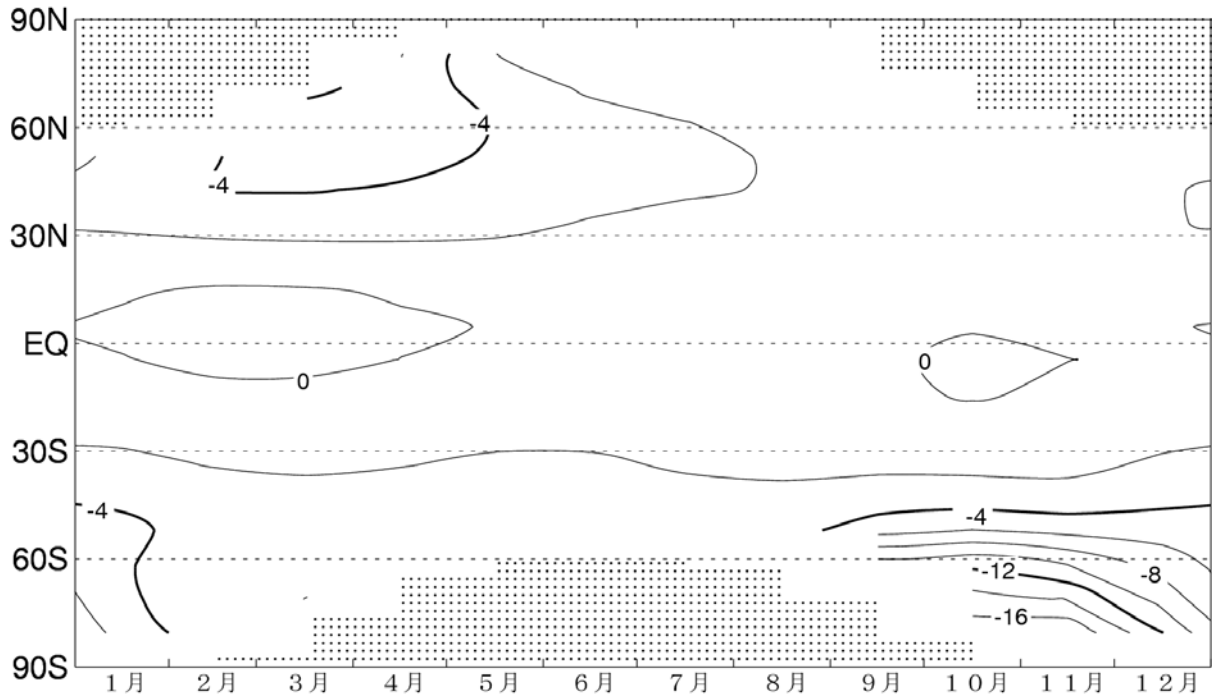


図 11 オゾン全量トレンドの緯度別・月別変化 (1979 ~ 2000 年)

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 2 % / 10 年毎。NASA 提供の MOD データ ( p.19 脚注参照 ) を基に作成。なお、2001 年以降については、地上観測値に対する比偏差が正となりばらつきも大きいため、2000 年までの MOD データを用いた結果を示す。両極域の点域については、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 2004

\* 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.101 ) 参照。



### (3) オゾンの高度分布のトレンド

図 12 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 13 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。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の減少率は小さくなる。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 14 は 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。中高緯度の高度 40km 付近で減少傾向が大きい。

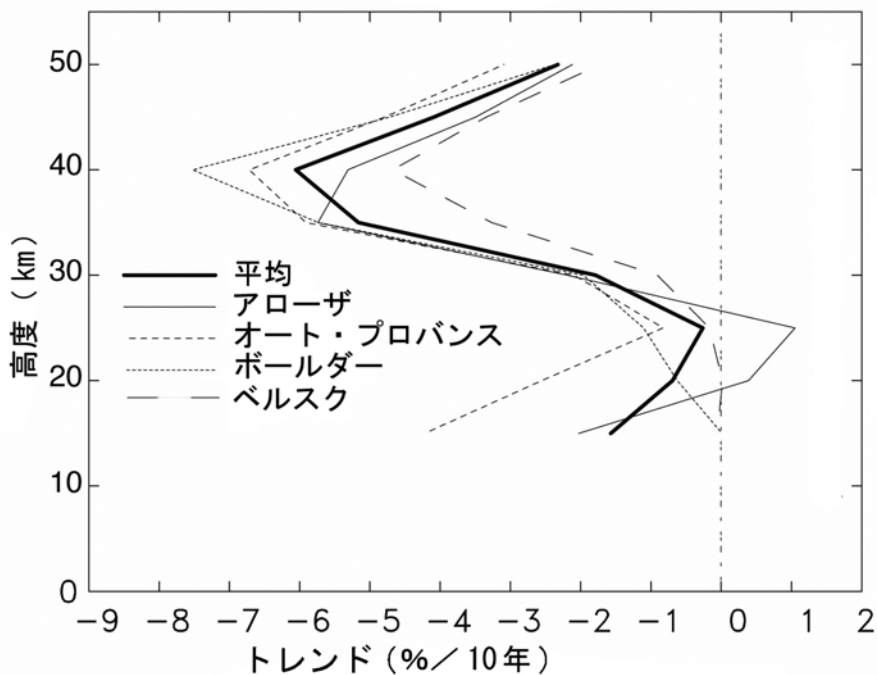


図 12 オゾンの高度別トレンド（1979～1999 年）

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)

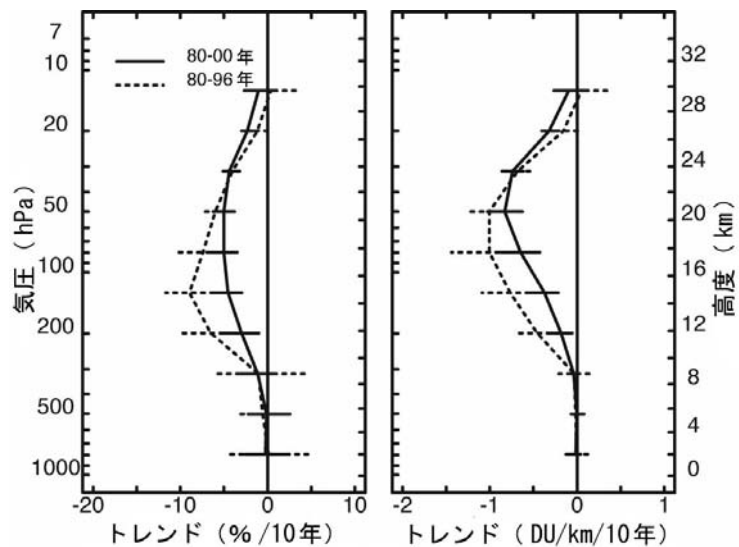


図 13 オゾンゾンデ観測の高度別オゾントレンド

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 ( $\pm 2$ ) 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)

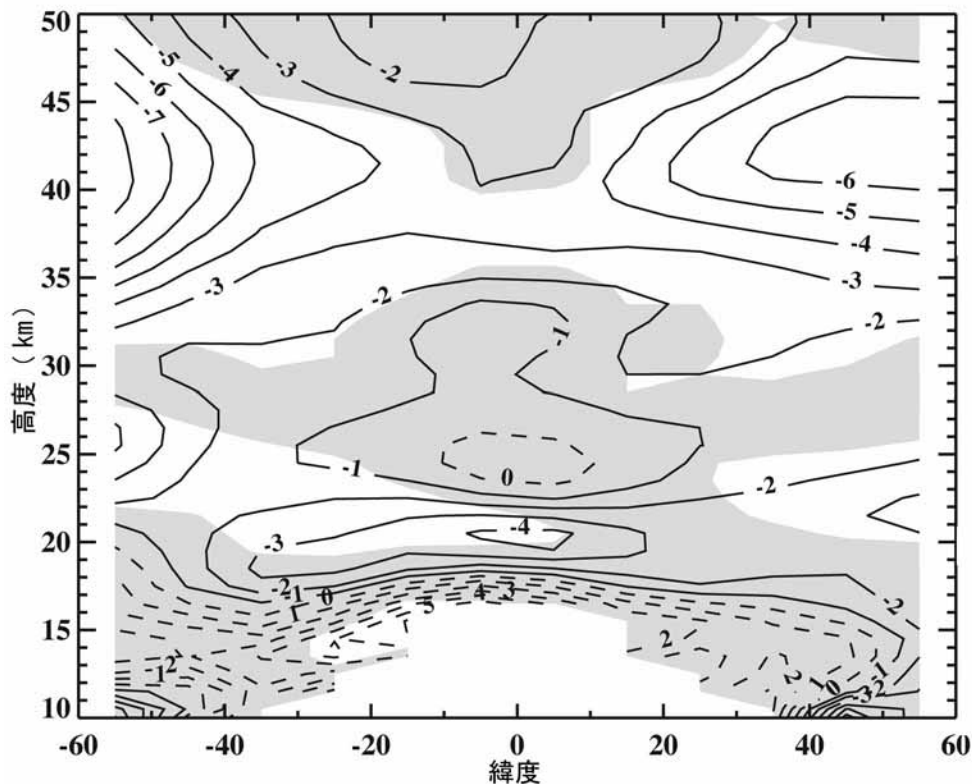


図 14 成層圏オゾントレンドの緯度・高度変化(1984～2000)

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領域。

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

#### (4) トレンド解析におけるオゾンの減少要因

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、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<sup>\*</sup>の発達<sup>\*</sup>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。

---

<sup>\*</sup> 南極域上空のオゾンホール<sup>\*</sup>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。