

1 オゾン層の状況

オゾンの観測には、地上からのオゾン全量の観測、衛星からのオゾン全量の観測、オゾンゾンデによる鉛直分布の観測、地上からの鉛直分布の観測（反転観測*）、衛星からの鉛直分布観測等がある。

ここでは、気象庁オゾン層情報センターが入手したデータをもとに解析したオゾン層の状況を示す。なお、それぞれのデータについての説明は付録1「解析に使用した観測資料」にまとめた。

1-1 全球のオゾン層

2007年のオゾン全量*の全球分布をみると、ほとんどの地域で参照値*より少なかった（図1-1-1）。特に、南半球高緯度と北半球高緯度では比偏差*が-5%以下となったところが多かった。

オゾン全量の全球平均値の経年変化をみると、低緯度を除いて1980年代を中心に減少が進み、現在も少ない状態が続いている（図1-1-3）。

1-1-1 2007年のオゾン層の状況

2007年のオゾン全量の全球分布をみると、ほとんどの地域で参照値より少なかった（図1-1-1）。特に、南緯60度以南では年平均で-5%以下となったところが多かった。北半球でも高緯度では-5%以下となったところが多かったが、アラスカ湾付近で参照値より多い領域があった。赤道付近に帯状に参照値よりも少ない領域があるが、これは6月から10月にかけて顕著であり、QB0*（準2年周期振動）の影響と考えられる（解説2「オゾン量の経年変動に影響を及ぼす自然の要因1」参照）。北半球高緯度は、3月から4月にかけて顕著な負偏差だった。各月の月平均オゾン全量分布とその比偏差図は資料1「月平均オゾン全量・比偏差 全球分布図」に示した。

緯度別平均オゾン全量月平均値の年間の推移を図1-1-2に示す。これをみると、北緯60度～南緯60度の平均は、どの月も参照値より少なめだった。緯度帯別にみると、北半球高緯度（北緯60度以北）で3月と4月に顕著に少なかった。また、南半球中緯度（南緯30度～南緯60度）でも1月から4月に顕著に少なかった。北半球中緯度（北緯30度～北緯60度）では、9月以降少ない状況が継続した。

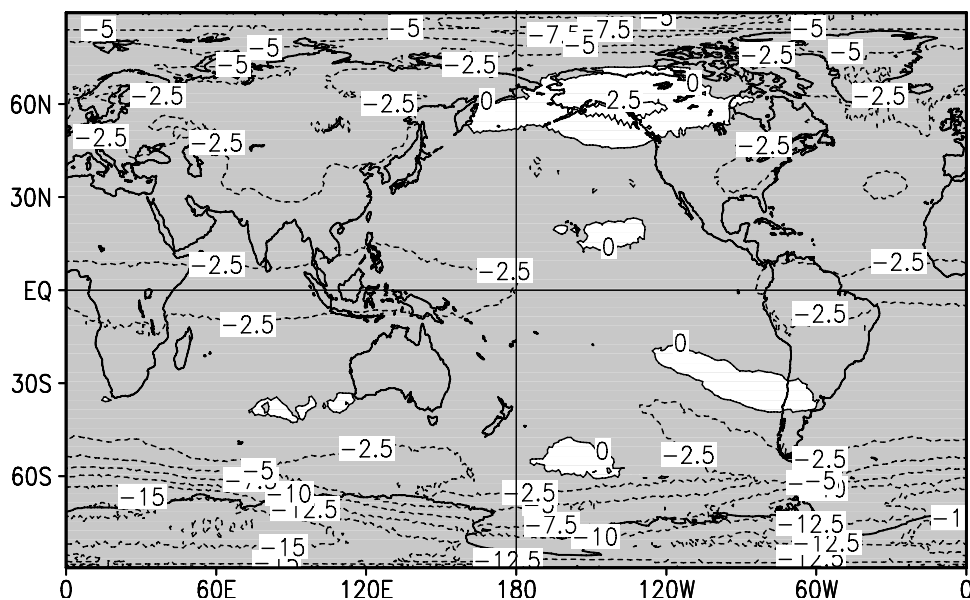


図1-1-1：2007年のオゾン全量比偏差(%)の全球分布

月平均オゾン全量比偏差(%)の2007年平均分布。等値線間隔は2.5%。比較の基準である参照値は1979～1992年の平均値。北緯60度以北の1月と11、12月および南緯60度以南の5～7月は、太陽高度角の関係で観測できない時期があるため省いて計算した。NASA提供の衛星観測データから作成。

* は「用語解説」(p60～62)を参照。

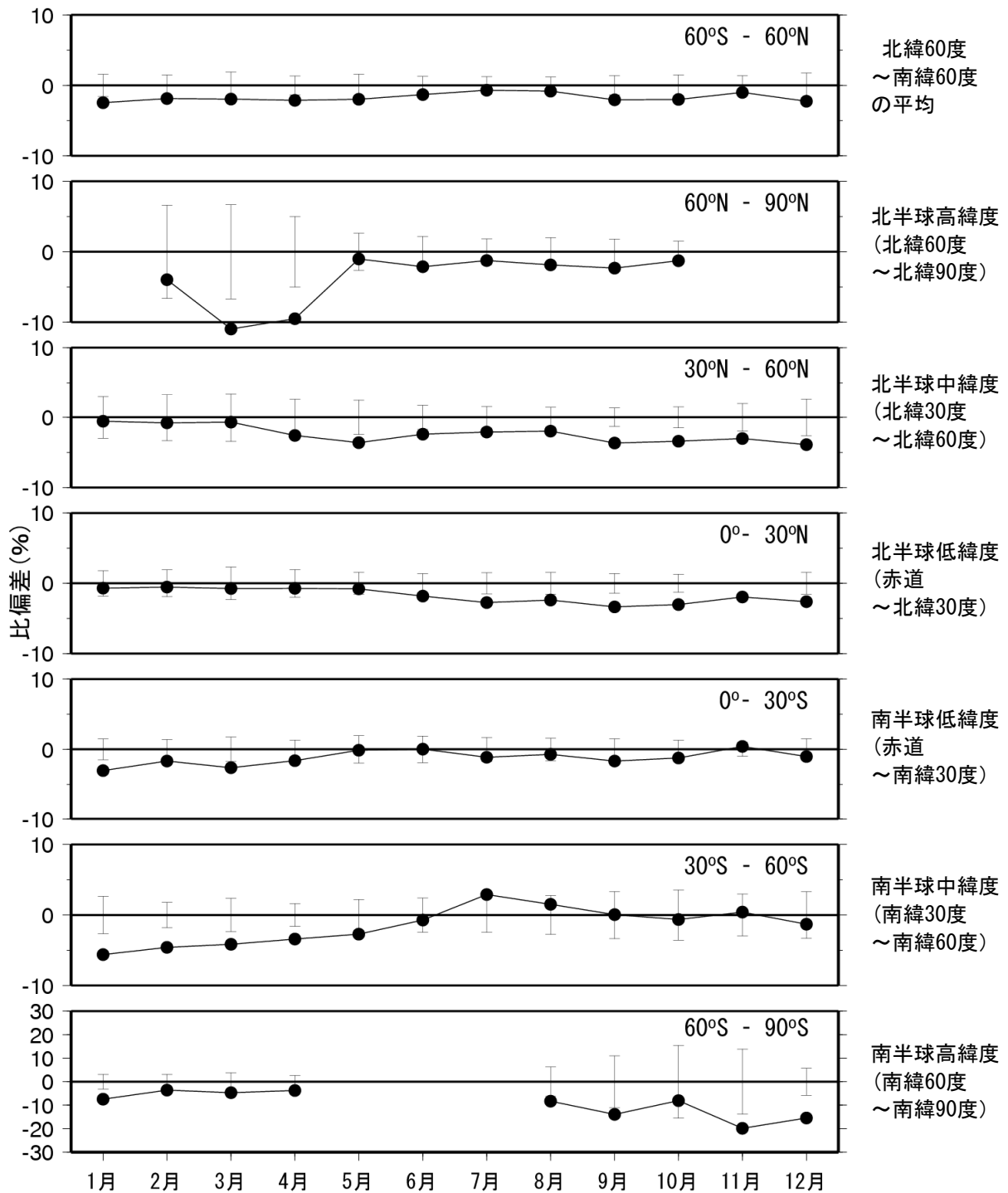
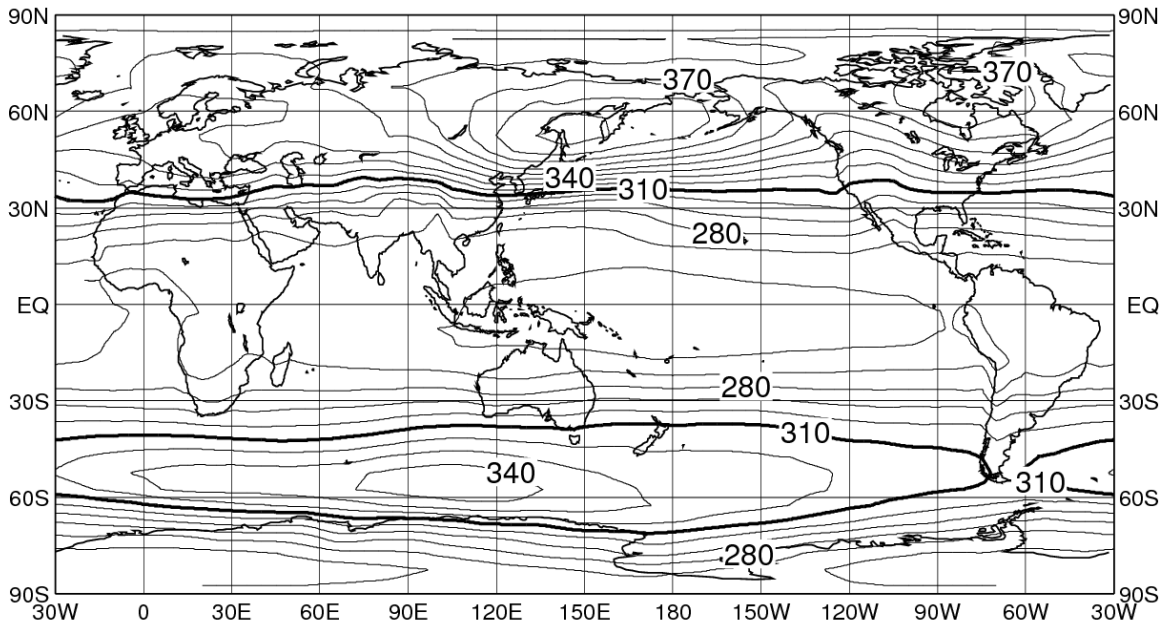


図1-1-2：緯度帯別平均オゾン全量月平均値比偏差(%)の2007年の推移
 縦線は参照値の標準偏差。参照値は1979～1992年の平均値。北緯60度以北の1月と11、12月および南緯60度以南の5～7月は、太陽高度角の関係で観測できないため示していない。NASA提供の衛星データから作成。

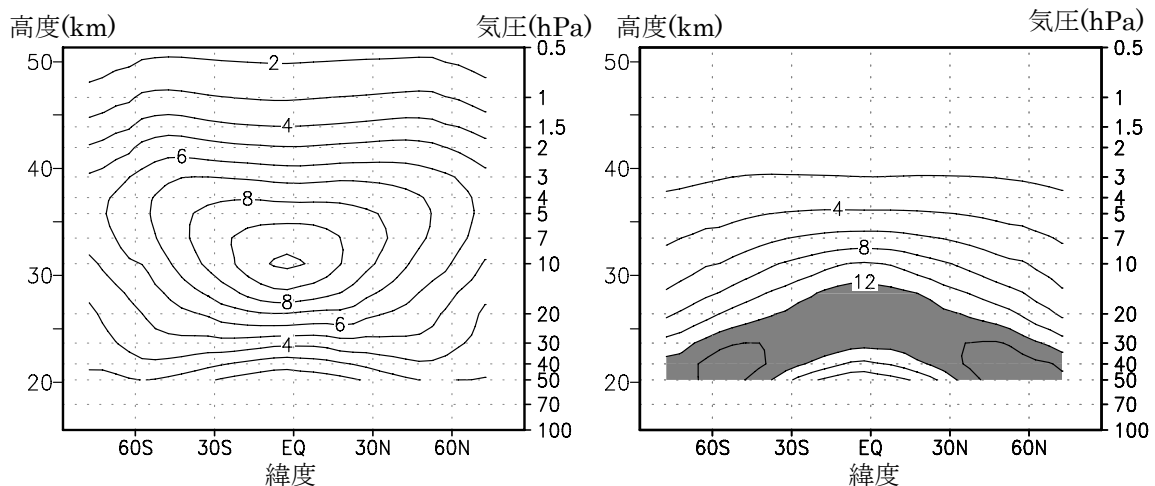
解説1 オゾンの平均的な分布とその形成メカニズム

オゾン分布の気候値として、衛星観測による年平均オゾン全量全球分布の参照値（1979年から1992年の平均）を図E1-1に示す。全体的にみてオゾン全量は低緯度で少なく、南北両半球の中・高緯度で多い分布になっている。特にオホーツク海上空は世界的にみて気候値として最もオゾンが多い場所であり、日本上空はオゾン全量の南北の傾度が最も大きい地域にあたる。

衛星観測による年平均帯状平均オゾン濃度の高度緯度分布を図E1-2に示す。体積混合比でみると10hPa付近の高度にオゾンが多く分布しており、赤道付近に最もオゾンが多い場所があることがわかる。一方、オゾン分圧でみた場合、低緯度域では高度25km付近（20～30hPa付近の高度）で多いが、中・高緯度ではそれよりも低い高度22km付近（40～50hPa付近の高度）で多くなっている。



図E1-1：年平均全球オゾン全量の参照値（1979～1992年の平均値）
等値線間隔は10m atm-cm。NASA提供の衛星データ（TOMSデータ）から作成。

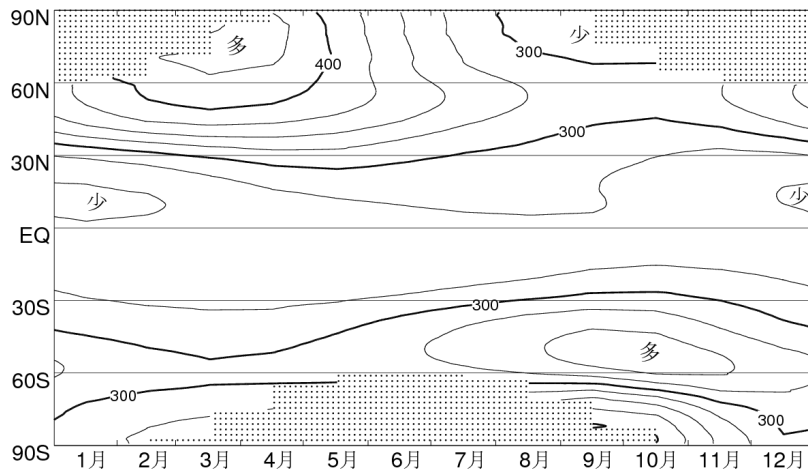


図E1-2：年平均帯状平均オゾン濃度子午面分布（左：体積混合比、右：オゾン分圧）の参照値（1979～1992年の平均値）
等値線間隔は、左：1ppmv、右：2mPa。右の陰影部は12mPa以上の領域。NOAA提供の衛星データ（SBUV/2データ）から作成。

带状平均オゾン全量参照値の季節変化を図E1-3に示す。南北両半球とも冬季から春季にかけての中・高緯度でオゾン全量が最大となる季節変化をしている。

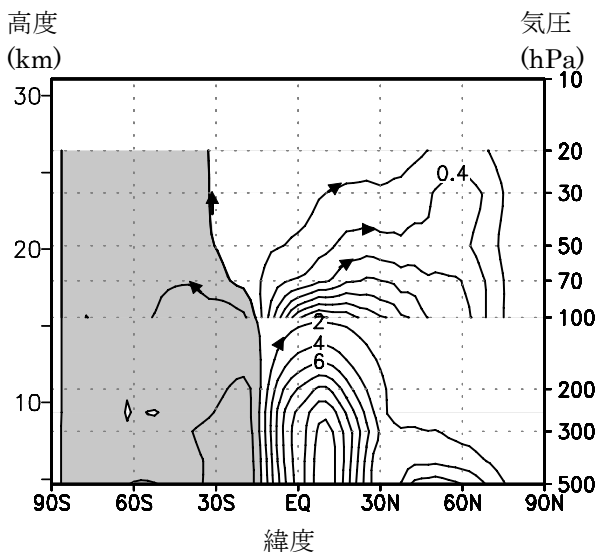
上述したような平年のオゾン量の高度・緯度分布や季節変化は、以下のように説明される。

成層圏のオゾンは、太陽紫外線による光化学反応で生成される。太陽の放射が強い低緯度上空の成層圏はオゾンの主要な生成場所である。赤道上空の高度30km (10hPa) 付近で体積混合比の最大がみられるのはこのためである (図E1-2 左)。低緯度成層圏で生成されたオゾンは、ブリューワー・ドブソン循環 (赤道域で対流圏から成層圏に上昇してきた空気が、成層圏を両極へ向けてゆっくりと移動し、中・高緯度で成層圏から対流圏へ下降する循環) で、中・高緯度に運ばれる。北半球冬季のこの循環の様子を図E1-4に示す。中・高緯度では、下降したオゾンを含む空気が下部成層圏で圧縮されオゾン分圧は大きくなるため、低い高度で最大のオゾン分圧が現れ、しかもオゾン分圧は赤道域上空よりも大きくなる (図E1-2 右)。このような赤道域から中・高緯度への輸送は冬季に最も活発となり、冬季から春季にかけて中・高緯度にオゾンが最も蓄積される。同一の緯度でもオホーツク海上空やカナダ北部が世界的にオゾン全量の多い地域となっているが、これは、冬季から春季にかけての地上気圧で、太平洋ではアリューシャン低気圧、大西洋ではアイスランド低気圧が形成され、低気圧の西側では成層圏の下限である圏界面が低くなる性質があり、成層圏のオゾンが蓄積されやすくなることによる。このため日本の上空では南北傾度が大きくなる。



図E1-3：带状平均オゾン全量参照値（1979～1992年の平均値）の季節変化

等値線間隔は25m atm-cm。陰影部は太陽高度角の関係で観測できない領域。NASA提供の衛星データ (TOMSデータ) から作成。



図E1-4：上部対流圏から下部成層圏における12-2月平均の带状平均子午面循環

12-2月平均の大気の子午面循環*を示す。値は質量流線関数 (TEM法による) であり、等値線に沿って矢印の方向へ大気が循環していることを示す。成層圏で見られる子午面循環がブリューワー・ドブソン循環。対流圏の熱帯域にみられる循環はハドレー循環。等値線間隔は100hPaより上で $0.2 \times 10^{10} \text{kg/s}$ 、100hPaより下で $2 \times 10^{10} \text{kg/s}$ 。負値に陰影。大気再解析データを用いて作成。

*は「用語解説」(p60～62)を参照。

解説2 オゾン量の経年変動に影響を及ぼす自然の要因1 (太陽活動とQB0)

オゾン量の経年的な変動に影響を与える周期的な自然変動要素として、太陽活動と準2年周期振動(QB0*)がよく知られている。

太陽活動の極小期から極大期への変化に同期して、全球平均のオゾンは2~3%増加する(付録3「EESCフィッティングによるトレンドの評価」参照)。高度方向には、成層圏界面付近と下部成層圏の二つの領域で同程度変化する。

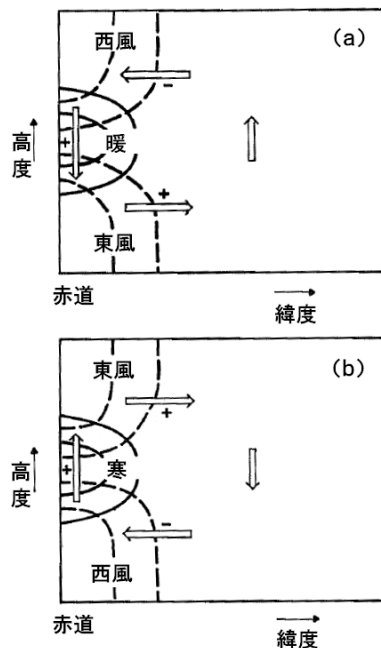
太陽活動にともなって200~250nmの紫外線強度は4~8%変化するので、この波長域の紫外線でオゾンが生成する成層圏界面付近の変動は説明が可能であるが、大半のオゾンが存在する下部成層圏の変動は説明できない。下部成層圏の変動を説明するメカニズムとして次のような力学過程が提案されている。

太陽活動極大期の紫外線強度の増加は成層圏界面付近で気温を高める。成層圏界面付近の風の分布は、秋から冬にかけて、西風の中心位置が亜熱帯から極域に遷移するという季節進行をしている。太陽活動の活発化にともなう成層圏界面付近の昇温はわずかだが、惑星波動の伝搬特性が変化することを通して、西風の中心位置の遷移の季節進行に影響を与える。すなわち、亜熱帯域の西風はより強まり、より長く続く傾向を持つ。この上部成層圏の変化が下部成層圏の波動擾乱と平均循環に変化をもたらし、オゾン量を増やす方向にはたらく(Kodera and Kuroda, 2002)。

一方、約2年の周期をもつ赤道上空の成層圏の東西風の振動であるQB0は、赤道付近と南北の緯度25度付近を中心に高緯度にのびる緯度帯に2~4%のオゾンの偏差を生じ、両者は逆位相である(口絵1)。QB0は子午面内で次のような循環の偏差を生じてオゾン量に変化をもたらすと考えられる。

高度とともに東風から西風に変化するQB0の西風相(図E2-1 a)では、赤道から離れたところで働くコリオリ力によって、上層の西風域で赤道向きの、下層の東風域で極向きの子午面循環が生じ、補償流として赤道付近で下降流、赤道から離れたところで上昇流が生じる。この鉛直流は温度の緯度勾配をもたらし、温度風の関係を通じて西風の強さも若干変える。東風相ではこれと反対の子午面循環(図E2-1 b)が生じる。成層圏のこの高度範囲(30kmより下層)でオゾン混合比は上層ほど高いため、下降流域では正の、上昇流域では負のオゾン量の変動を起こす(Plumb and Bell, 1982)。

QB0にともなうオゾン変動の大きさは、季節や太陽活動の位相と関連して変わることが知られており、調査・研究が進められている。



図E2-1: QB0にともなう子午面循環の偏差の模式図

赤道上空の気温偏差(寒暖)、西風の加速(+/-)の関係とともに示す。(a)西風相、(b)東風相の場合。Plumb and Bell(1982)による図。破線:等風速線、実線:等温線。

* は「用語解説」(p60~62)を参照。

1-1-2 全球のオゾン層の経年変化とトレンド

オゾン全量は、低緯度を除いて1980年代を中心に減少が進み、現在も少ない状態が続いている。オゾン全量の減少率は、低緯度域で小さく、高緯度域で大きい。季節的には、北半球では3～4月に、南半球では8～12月にオゾンの減少傾向が大きい。鉛直分布では、高度40km付近と15km付近の二つの高度に減少率の大きい領域がある。

ここでは、全球のオゾン層の長期変化傾向に関する解析結果を述べる。特に断らない限り、既知で周期的な自然要因（季節変動、太陽活動、QBO*（準2年周期振動：Quasi-Biennial Oscillation））と相関の高い変動成分を除去したデータを用いている。

オゾン全量の経年変化

地上および衛星からの観測による月平均オゾン全量の比偏差*（1970年から1980年の平均値に対する）の時系列を図1-1-3に示す。これによると、オゾン全量は1980年代から1990年代前半にかけて大きく減少しており、現在もオゾン全量は少ない状態が続いている。オゾン全量の長期的な減少の主な要因は、クロロフルオロカーボン（フロン）類などから解離した塩素が、大気中で増加したためと考えられる。成層圏におけるオゾン層破壊物質の濃度は、EESC*（等価実効成層圏塩素）として指標化されており、オゾン全量の経年変化のうちオゾン層破壊物質の影響による変化成分をみるために、1970年から2007年のオゾン全量（地上観測データ）に対してEESCフィッティング（付録3参照）を行った。2007年現在の全球平均のオゾン全量の変化は、1979年を基準にした場合 $-2.8 \pm 0.2\%$ である。1980年代は変化量が多く、全球平均では $-2.0 \pm 0.1\%/10$ 年、北半球では $-1.9 \pm 0.2\%/10$ 年、南半球では $-2.1 \pm 0.2\%/10$ 年と大きな減少がみられた。南半球のトレンドについては、観測点が8地点であることに注意する必要がある（北半球は55地点）。北半球は、1993年ごろに最小値を記録したが、これは、ピナトゥッポ火山噴火（1991年6月）にともない、成層圏のエロゾル粒子が増加し、その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ためと考えられている。

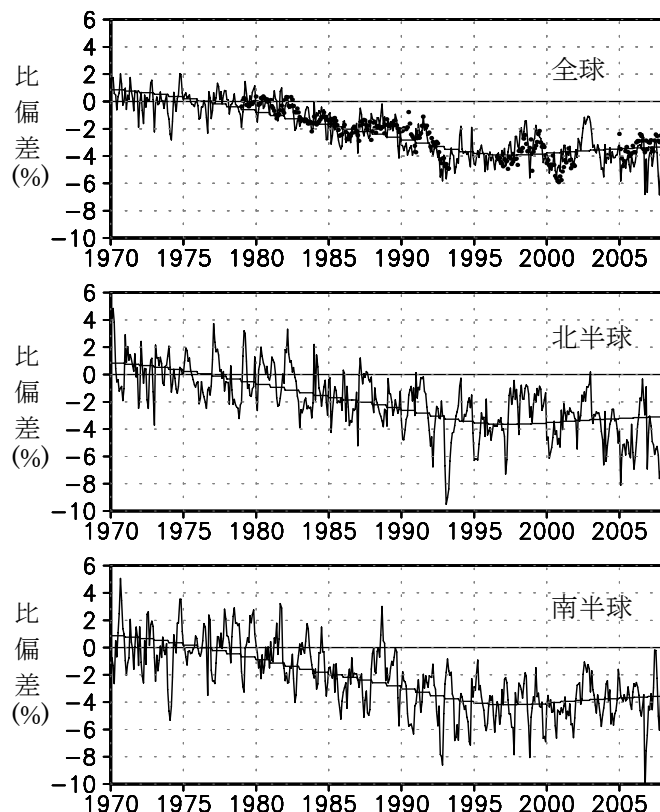


図1-1-3：世界のオゾン全量比偏差の推移

実線は世界の地上観測によるオゾン全量比偏差。滑らかな実線はEESCフィッティング曲線。●印は衛星観測データ（北緯70度～南緯70度）によるオゾン全量比偏差。比較の基準である参照値は1970～1980年の平均値。季節変動、太陽活動、QBOの影響を除去。上段から全球（北緯70度～南緯70度）、北半球、南半球のオゾン全量の変化を示す。全球の地上観測点数は63地点で、北半球55地点、南半球8地点である。

* は「用語解説」（p60～62）を参照。

衛星観測データによるオゾン全量トレンドの緯度分布と全球分布

衛星観測データによる通年の緯度10度ごとのオゾン全量トレンドを図1-1-4に示す。1979年から2007年のデータに対してEESCフィッティング（付録3参照）を行って求めた1980年代の変化量を示した。また、1998年以降2007年までのデータを用い、直線回帰で求めた変化量も示した。1980年代の変化量(図1-1-4の黒丸)をみると、低緯度では減少率は小さいものの、どの緯度でも有意な減少傾向がみられる。減少率は、高緯度ほど大きくなっており、次項に示す地上観測と同様の傾向を示す。1980年以前を基準とした場合の現在のオゾンの緯度別変化量は、図1-1-4で示した1980年代の変化量に比例している。1998年以降2007年までの変化量をみると、北半球中緯度に増加傾向がみられるが、これは解説6「オゾン量の経年変動に影響を及ぼす自然の要因2」に示すように、大気の流れに関係した力学的要因が寄与している可能性があり、成層圏の塩素量の減少にともなった変化と判断することはできない。

衛星観測から計算した北緯60度～南緯60度平均の2007年のオゾン全量は、1979年を基準とした場合、 $-3.0 \pm 0.2\%$ 変化した。オゾン全量トレンドの全球分布を図1-1-5に示す。

付録1-2「オゾンの衛星観測データ」に示すように、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では、それ以降のデータはトレンド解析には使用できないとしている。このため、2002～2004年のTOMSデータは本項のトレンド計算には使用していない。2005年1月以降については、最近運用が開始されたNASAのオーラ衛星搭載のOMIによるデータを使用した。2005年以降のOMIデータについて、地上観測値との比較を行い、トレンド解析に用いるのに十分な精度であることを確認している。なお、1995年の通年と1993、1994、1996年の一部についてはTOMSによる観測が行われていないので、この期間のデータは使わずに解析を行っている。

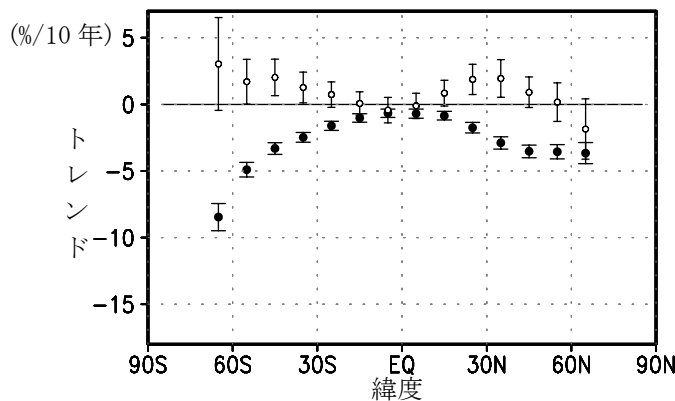


図1-1-4：衛星データによるオゾン全量緯度別トレンド (%/10年)

年平均オゾン全量の緯度別トレンド (%/10年、緯度10度毎)。●印は、1979～2007年の月別値に対してEESCフィッティングを行って求めた1980年代における変化量。○印は1998年以降2007年までのデータを用い、直線回帰で求めた最近の変化量。横軸は緯度、縦軸はトレンド。丸印の上下の横線は95%信頼区間の範囲。NASA提供の衛星データから作成。

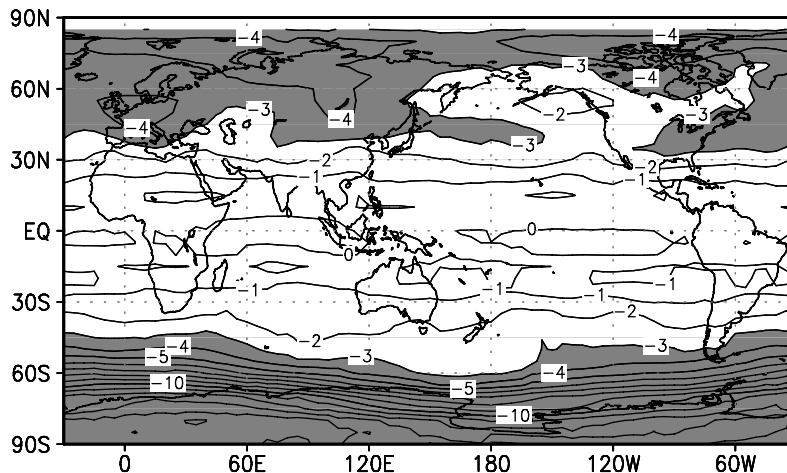


図1-1-5：オゾン全量トレンド (%/10年) の全球分布

1979～2007年の月別値に対してEESCフィッティングを行い、1980年代における変化量で示した。1980年以前を基準とした場合の現在のオゾン変化量は、この1980年代の変化量に比例している。等値線間隔は1%/10年。陰影部は変化率が-3%を超える領域。北緯60度以北と南緯60度以南では太陽高度角の関係で観測できない時期があることに注意。NASA提供の衛星データから作成。

地上観測データによるオゾン全量トレンドの緯度分布

世界の地上観測データによるオゾン全量トレンドの緯度分布を図1-1-6に示す。1979～2007年のデータに対してEESCフィッティング（付録3参照）を行って求めた1980年代の変化量を示した。また、1998年以降2007年までのデータを用い、直線回帰で求めた変化量も示した。これをみると、1980年代の変化量は通年および各季節とも低緯度を除いて多くの地点で減少傾向を示していたことがわかる。通年では、北半球の中緯度と南半球の南緯30度以南で有意な減少傾向を示している地点が多い。季節別にみると、9～11月の南緯60度以南では、南極オゾンホール出現にともない-15%/10年を超える減少を示していた。このように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た。一方、1998年以降2007年までの変化量をみると、通年および各季節とも北半球中緯度で増加傾向を示している地点もあるが、地点毎のばらつきも大きい。

トレンド計算に1979年以降のデータを使用したのは、①オゾン減少が明瞭になり始めた時期にあたること、②衛星データが得られる時期であり、データを比較する際に期間を合わせることを望ましいためである。観測地点の選択にあたっては、最近の観測資料がほぼ継続して得られていること、および毎月の月平均値と衛星による観測データとの全期間を通じた比較において、データの精度に大きな問題がないと判断されることを基準とした。なお、観測機器の変更等により観測データに不自然な段差がみられる場合には、その観測データに補正を施したのち、解析を行っている。

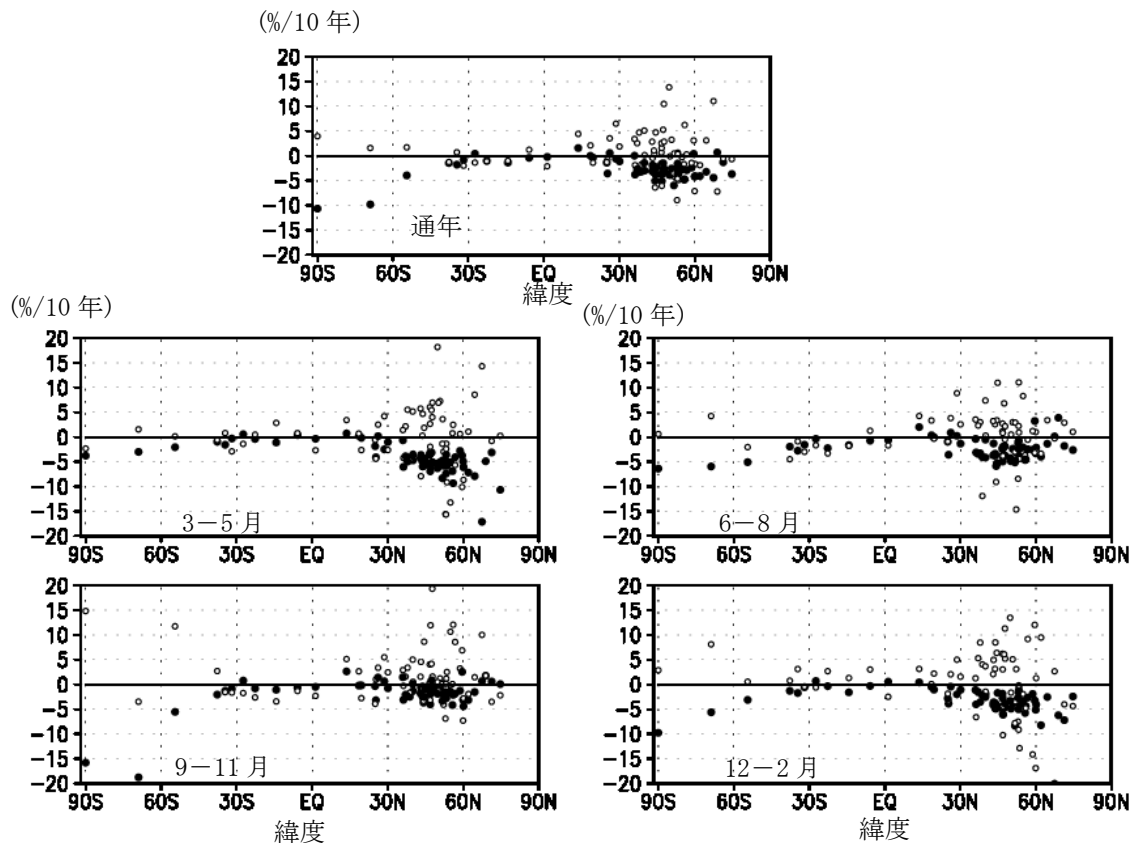


図1-1-6：地上観測データによるオゾン全量の地点別トレンド（%/10年）

上段：通年、中段左：3～5月、中段右：6～8月、下段左：9～11月、下段右12～2月。

●印は1979～2007年の月別値に対してEESCフィッティングを行って求めた1980年代における変化量。○印は1998年以降2007年までのデータを用い、直線回帰で求めた最近の変化量。横軸は緯度、縦軸は変化量。世界の観測地点（66地点）のオゾン全量データから作成。

衛星観測データによるオゾン全量トレンドの季節変化

オゾン全量のトレンドの季節変化をみるため、帯状平均オゾン全量トレンドの季節変化を図1-1-7に示す。このトレンドも1979～2007年のデータに対してEESCフィッティング（付録3参照）を行って求めた1980年代の変化量で示したものである。1980年以前を基準とした場合の現在のオゾン変化量は、この1980年代の変化量に比例している。これをみると、北半球高緯度では3～4月に、南半球中・高緯度では8～12月にオゾンの減少傾向が大きい様子がわかる。季節別のオゾン全量トレンドの全球分布を図1-1-8に示す。

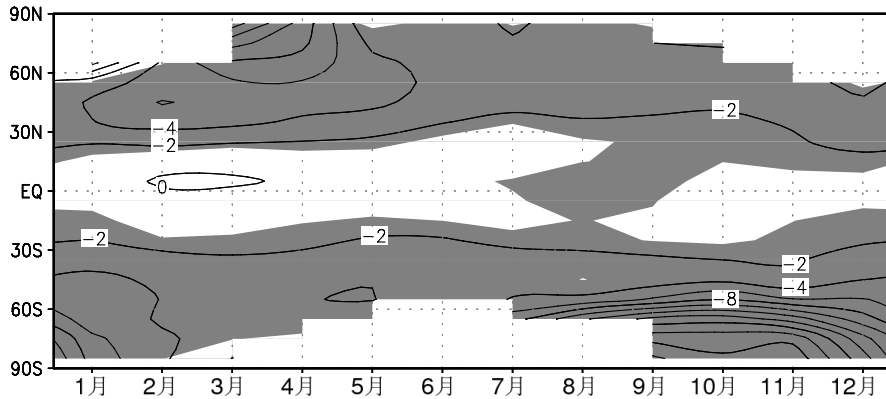


図1-1-7：帯状平均オゾン全量トレンド（%/10年）の季節変化

1979～2007年の月別値に対してEESCフィッティングを行って求めた1980年代における変化量で示した。1980年以前を基準とした場合の現在のオゾン変化量は、この1980年代の変化量に比例している。等値線間隔は2%/10年。陰影部は95%信頼区間の範囲が全て負である領域。北緯60度以北と南緯60度以南では太陽高度角の関係で観測できない時期があることに注意する必要がある。NASA提供の衛星データから作成。

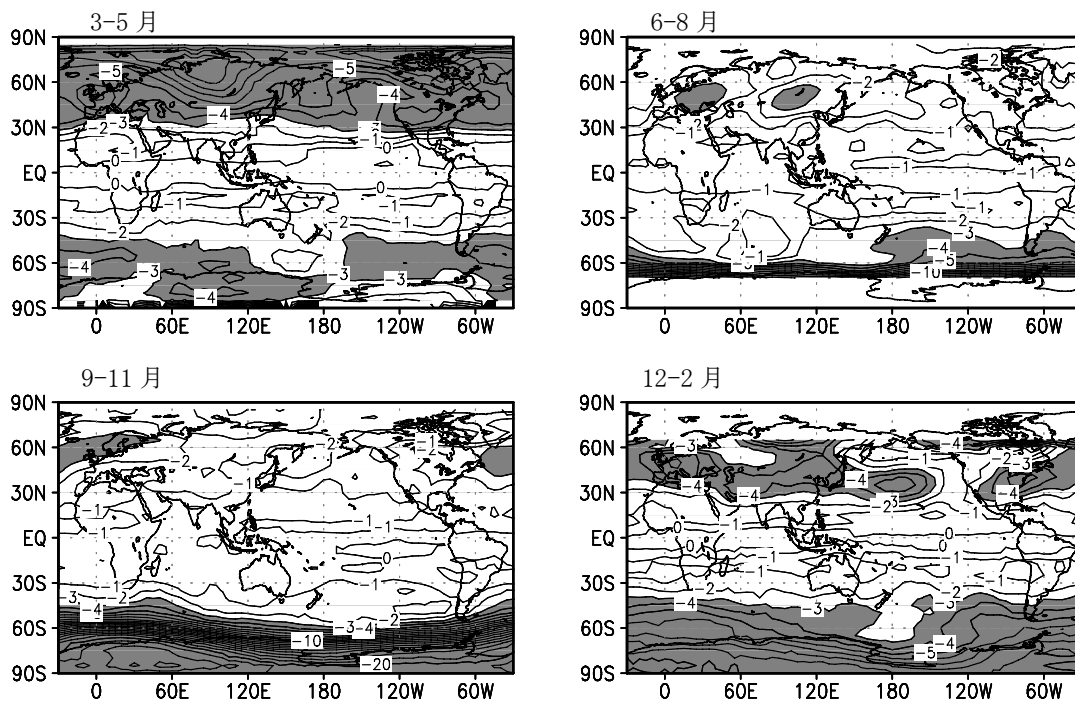


図1-1-8：季節別オゾン全量トレンド（%/10年）の全球分布

1979～2007年の月別値に対してEESCフィッティングを行って求めた1980年代における変化量で示した。1980年以前を基準とした場合の現在のオゾン変化量は、この1980年代の変化量に比例している。等値線間隔は1%/10年。陰影部は減少率が3%を超える領域。北緯60度以北と南緯60度以南では太陽高度角の関係で観測できない時期があることに注意する必要がある。NASA提供の衛星データから作成。

オゾンの鉛直分布のトレンド

オゾンの鉛直分布のトレンドをみるため、衛星観測から求めた年平均帯状平均オゾントレンド（1979～2003年のデータに対してEESCフィッティングを行って求めた1980年代の変化量で示す。1980年以前を基準とした場合の現在のオゾン変化量は、この1980年代の変化量に比例している。）の子午面分布（高度緯度分布）を図1-1-9に示す。これによると、北半球、南半球とも中緯度から高緯度にかけての、3hPa高度付近（40km付近）と50hPa高度以下（20km付近以下）の二つの高度に減少率の大きい領域がみられる。

ゾンデ観測、反転観測データも含めたデータから作成した、北半球中緯度の高度別オゾントレンド（図1-1-10、WMO, 2006より）をみても、オゾン減少の極大は高度40km付近と高度20km付近に現れていることがわかる。この二つの高度のオゾン減少は、ともにクロロフルオロカーボン類などから解離した塩素によるものと考えられているが、その破壊メカニズムは異なっている。高度40km付近の減少は、気相反応のみによって働く塩素による触媒反応サイクルによるのに対し、高度20km付近の減少は主にエロゾル粒子表面での不均一反応によって活性化される別の塩素触媒反応サイクルによると考えられている（解説3「南極でオゾンホールが発生するメカニズム」を参照）。

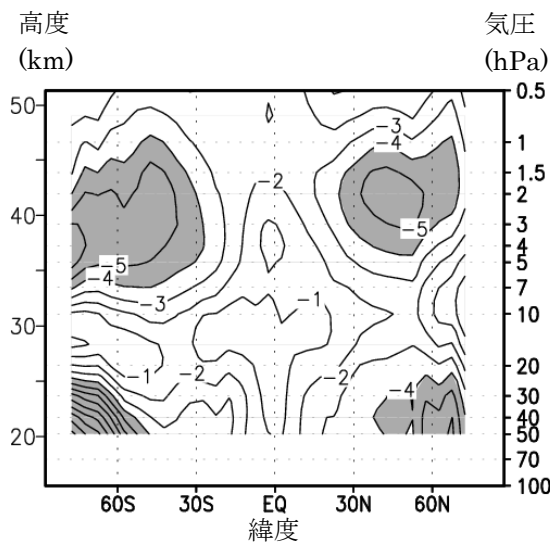


図1-1-9：年平均帯状平均オゾントレンド（%/10年）の子午面分布

1979～2003年の月別値（季節変動成分のみを取り除いた）に対してEESCフィッティングを行って求めた1980年代における変化量で示す。1980年以前を基準とした場合の現在のオゾン変化量は、ここで示した1980年代の変化量に比例している。等値線間隔は1%/10年。陰影部は減少率が-4%を超える領域。北緯60度以北と南緯60度以南では太陽高度角の関係で観測できない時期があるため、観測できない時期を除いた月別値からトレンドを計算した。NOAA提供の衛星データ（SBUV/2 ver. 8データ）から作成。

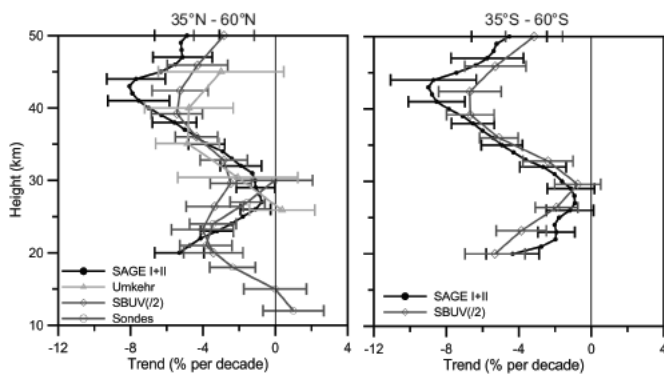


図1-1-10：オゾンのトレンドの高度分布

1980～2004年のSAGE I/II、SBUV/2、オゾンゾンデ、反転観測データをもとに作成した北半球中緯度（左）と南半球中緯度（右）の高度別オゾンのトレンド（%/10年）。EESCフィッティングを行って求めた1980年代における変化量で示す。実線がトレンド。図中の横線は95%信頼区間を示す（WMO, 2006）。