

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

2008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、南半球中高緯度と北半球中高緯度では参照値からの比偏差が-5%を下回ったところが多かった。

オゾン全量の全球的な経年変化をみると、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 2008年のオゾン層の状況

2008年のオゾン全量は、世界のほとんどの地域で参照値より少なかった（図1-1-1）。特に、南半球の中高緯度では参照値からの比偏差が-5%を下回ったところが多かった。北半球でも高緯度では-5%を下回ったところが多かった。赤道付近は帯状に参照値よりも多い領域があり、これは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）。

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。北緯60度から南緯60度の平均で比偏差を見ると、全ての月で参照値算出期間の標準偏差を下回っている。ただし、使用したNASA提供の2008年の衛星観測データに地上観測との差異が見られ、2008年の衛星観測によるオゾン全量は両半球中緯度において少なめであることに留意する必要がある。詳しくは、付録1-2「衛星によるオゾン観測データ」を参照。

各月の月平均オゾン全量分布とその比偏差図を資料1「月平均オゾン全量・比偏差 全球分布図」に示す。赤道付近（南緯10度～北緯10度）では、年の前半にQB0の影響と考えられるオゾン全量の正偏差が見られた。

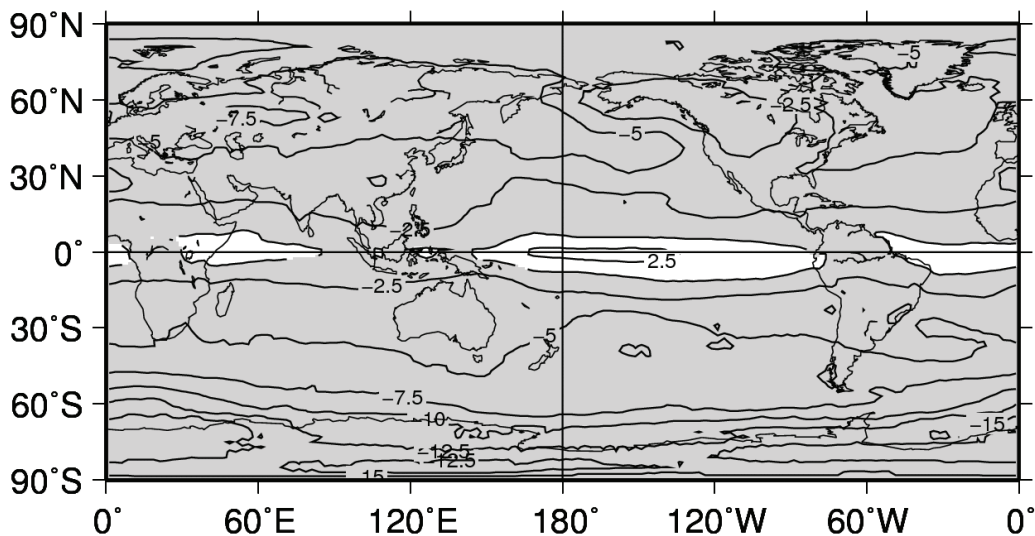


図1-1-1：2008年のオゾン全量比偏差(%)の全球分布

月平均オゾン全量比偏差(%)の2008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」(p59～61)を参照

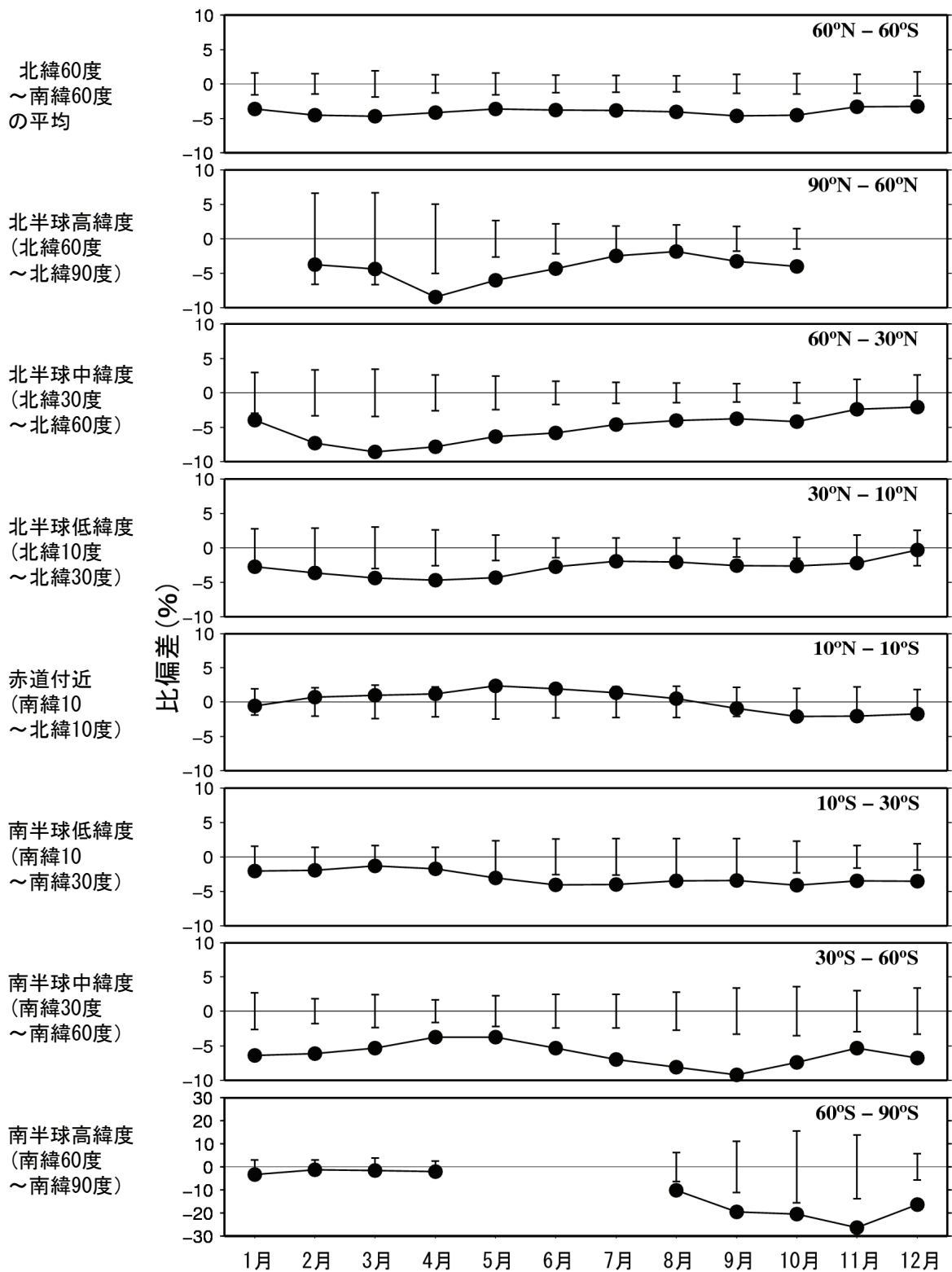


図1-1-2：緯度帯別平均オゾン全量月平均値比偏差(%)の2008年の推移
 縦線は参照値の標準偏差。比較の基準である参照値は1979～1992年の平均値。北緯60度以北の1月と11、12月および南緯60度以南の5～7月は、太陽高度角の関係で観測できないため示していない。NASA提供の衛星データから作成。

1-1-2 全球のオゾン層の経年変化と長期変化傾向

オゾン全量は、低緯度を除いて1980年代から1990年代前半にかけて大きく減少し、現在も少ない状態が続いている。オゾン全量の減少量は、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2～4月に、南半球では8～12月に減少傾向が大きい。鉛直分布では、高度40km付近と15km付近の二つの高度帯に減少量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））と関連の高い変動成分を除去した時系列データを用いている。これをEESC*（等価実効成層圏塩素）の変化曲線に当てはめることにより、オゾン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取り出している。この手法を「EESCフィッティング」と呼ぶ。オゾン層の長期変化傾向に言及する場合は、主に、フィッティング曲線上の2008年におけるオゾン量の値と1979年の値との比で示すことにした。これは年々の変動成分を含まない比である。詳細は、解説3「トレンド（長期変化傾向）の評価」を参照。

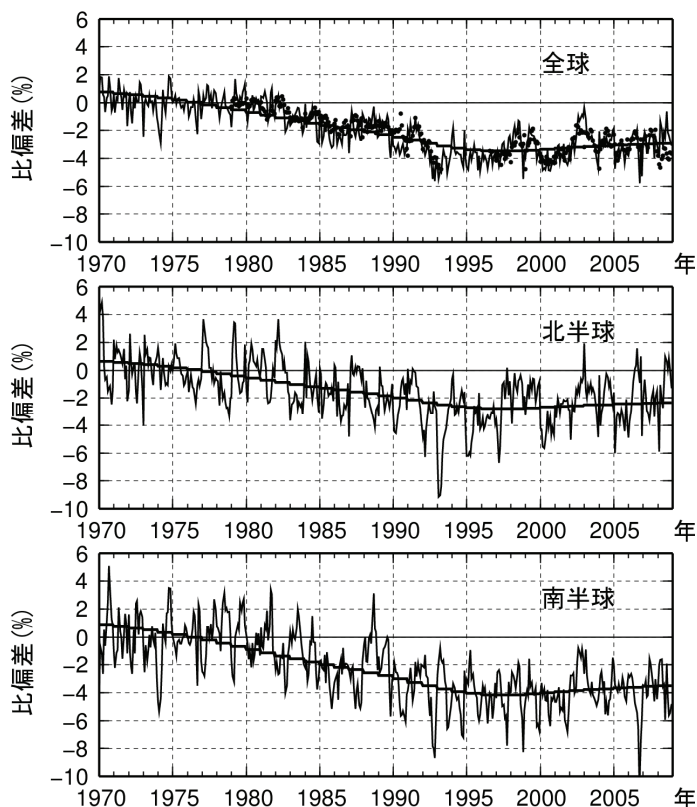
なお、1-1-2節で示した地上観測地点の選択にあたっては、最近の観測資料がほぼ継続して得られていること、および毎月の月平均値と衛星による観測データとの全期間を通じた比較において、データの精度に大きな問題がないと判断されることを基準とした。また、観測機器の変更等により観測データに不自然な段差がみられる場合には、その観測データに補正を施したのち、解析を行った。衛星観測データについては、精度検証の結果、2008年の衛星データはトレンド解析に適さないため統計計算から除外している。詳細は、付録1-2「衛星によるオゾン観測データ」を参照。

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1970年から1980年の平均値に対する比偏差の時系列を図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）類などが解離し、塩素原子が大気中で増加したためと考えられる。EESCフィッティングによる2008年現在の全球平均のオゾン全量は、1979年を基準にした場合の $-2.4 \pm 0.1\%$ である。1980年代は減少率が大きく、全球平均では $-1.8 \pm 0.1\%/10$ 年、北半球では $-1.4 \pm 0.2\%/10$ 年、南半球では $-2.1 \pm 0.2\%/10$ 年の減少がみられた。ただし、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、ピナトゥボ火山噴火（1991年6月）に伴い、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（解説4「南極でオゾンホールが発生するメカニズム」を参照）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。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。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。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。データは2009年2月19日までに世界オゾン・紫外線データセンター(WOUDC)で公開済のものを用いた。



*は「用語解説」(p59～61)を参照。

緯度帯別オゾン全量長期変化傾向

緯度帯別オゾン全量の長期変化傾向を示すため、2008年の緯度帯別オゾン全量の1979年比を図1-1-4左図と中図に示す。左図は世界の地上観測オゾン全量データ、中図は衛星観測によるオゾン全量データから、EESCフィッティングを用いて求めた。地上観測では、北半球の中緯度と南半球の南緯30度以南で顕著な減少を示している地点が多い。衛星観測でも低緯度では減少量は小さいものの、どの緯度でも有意な減少がみられ、減少は高緯度ほど大きくなっている。北半球の北緯30度以北ではほぼ同程度の減少がみられるが、南半球では高緯度ほど減少が大きい。参考のため、中図の衛星観測についてはEESCフィッティング曲線がほぼ最小値となる1998年におけるオゾン全量の1979年比を▲印で示している。

一方、最近の変化傾向を示すため、1998～2008年のデータから直線回帰により求めた変化傾向を図1-1-4右図に示した。地上観測、衛星観測ともに北半球中緯度に増加傾向がみられる。ただし、この結果は解説7「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、成層圏の塩素量を一定にした数値モデルを用いた実験でも再現されるため、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る。このため、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。

緯度帯別長期変化傾向の季節変化を示すため、図1-1-5に、2008年オゾン全量の1979年比を緯度帯別月に示した。これも衛星観測データからEESCフィッティングを用いて求めている。北半球高緯度では3～4月に、南半球中・高緯度では8～12月にオゾンの減少量が大きい様子がわかる。

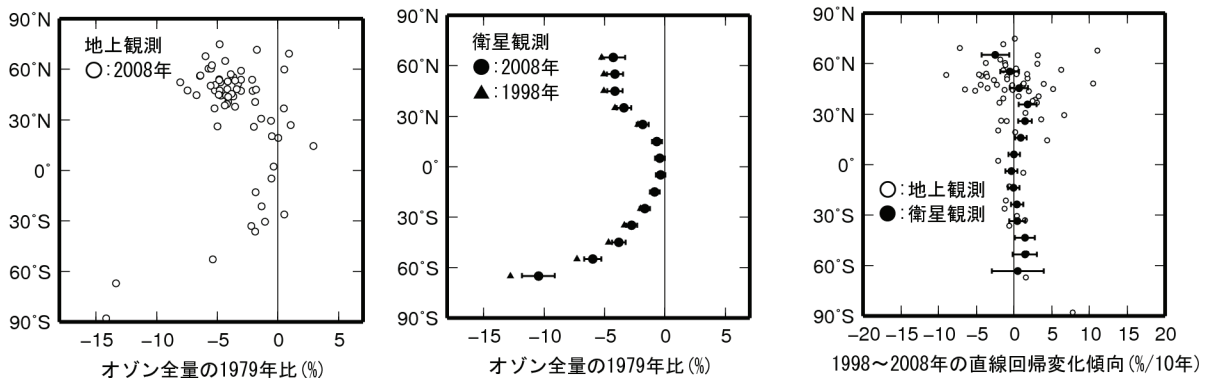


図1-1-4：オゾン全量長期変化傾向および最近の変化傾向の緯度帯別分布

オゾン全量長期変化傾向。左図は地上観測データ（観測点毎）、中図は衛星観測データ（緯度帯毎）。2008年オゾン全量の1979年比（%）でありEESCフィッティングを用いて求めた。中図の▲印は、1998年オゾン全量の1979年比（%）。右図は地上観測データ（○印）と衛星観測データ（●印）の1998～2008年のデータから直線回帰により求めた変化傾向（%/10年）。中図と右図の衛星観測データの左右の横線は95%信頼区間の範囲。世界の観測地点（66地点）のオゾン全量データおよびNASA提供の衛星観測データから作成。

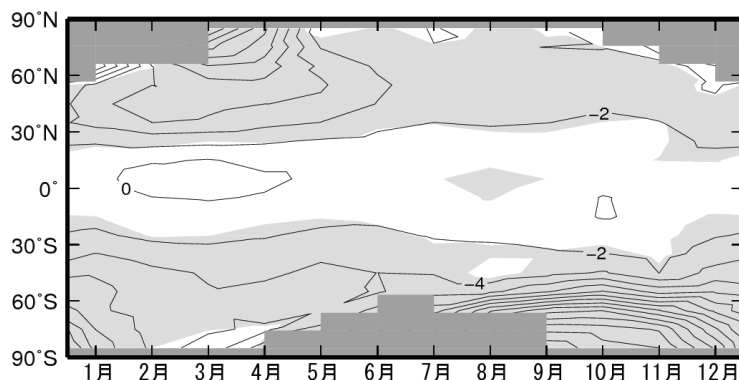


図1-1-5：緯度帯別オゾン全量長期変化傾向の季節変化

2008年オゾン全量の1979年比の月別分布。EESCフィッティングを用いて求めた。等値線間隔は2%。薄い陰影部は95%信頼区間の範囲が全て負である領域。濃い陰影部は欠測域（太陽高度角の関係で観測できない領域）。NASA提供の衛星観測データから作成。

オゾン全量長期変化傾向の全球分布

オゾン全量長期変化傾向の全球分布を示すため、1979年を基準とした2008年オゾン全量の比の全球分布を図1-1-6に示す。これは衛星観測データにEESCフィッティングを行って求めたものである。オゾン全量の長期変化傾向は、既に図1-1-4(中図)で示したように緯度帯による違いが大きい、同じ緯度帯でも場所によって異なっている。北半球ではヨーロッパ北部から西シベリアにかけて減少が大きい。南半球では南米南方からアフリカ南方にかけて減少が大きく、オーストラリア南方から南太平洋では小さい。また、季節毎にみると、両半球とも春季（北半球3～5月、南半球9～11月）に減少が大きい。衛星観測データから求めた北緯60度～南緯60度平均の2008年のオゾン全量は、1979年を基準とした場合、 $-2.5 \pm 0.2\%$ である。

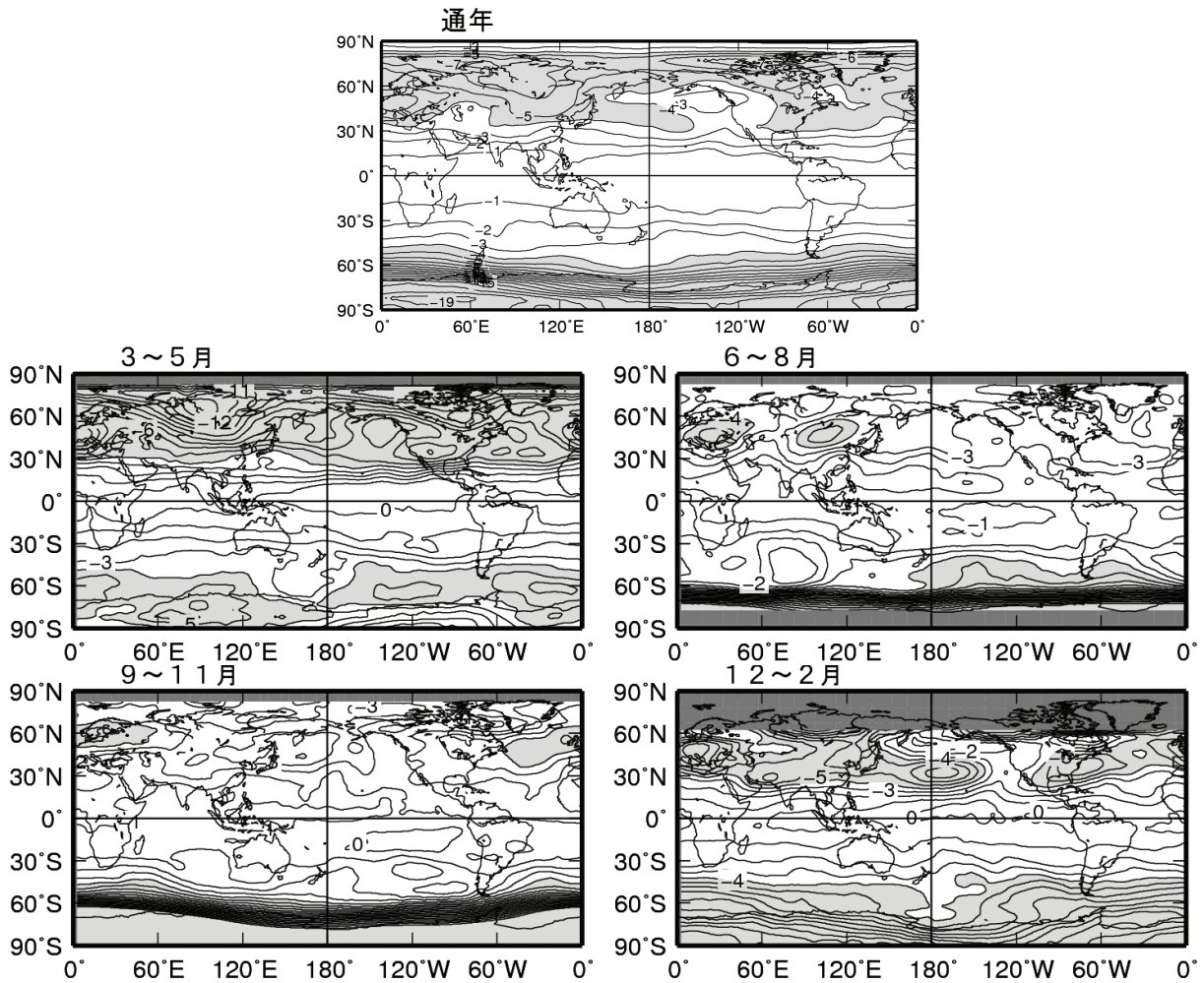


図1-1-6：オゾン全量長期変化傾向の全球分布（通年、季節別）

2008年オゾン全量の1979年比の分布（%）。EESCフィッティングにより求めた。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。等値線間隔は1%。薄い陰影部は比が-4%を下回る領域。濃い陰影部は欠測域。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提供の衛星観測データから作成。

オゾン緯度高度分布の長期変化傾向

オゾンの緯度高度分布の長期変化傾向を示すため、2008年のオゾン量の1979年比の緯度高度分布を図1-1-7に示す。これは衛星観測によるオゾン鉛直分布データにEESCフィッティングを行って求めたものである。北半球、南半球とも中緯度から高緯度にかけての、3hPa付近（高度40km付近）と50hPa以下（高度20km付近以下）の二つの高度に減少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された、北半球中緯度の高度別オゾントレンド（図1-1-8、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原子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ア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4「南極でオゾンホールが発生するメカニズム」を参照）。

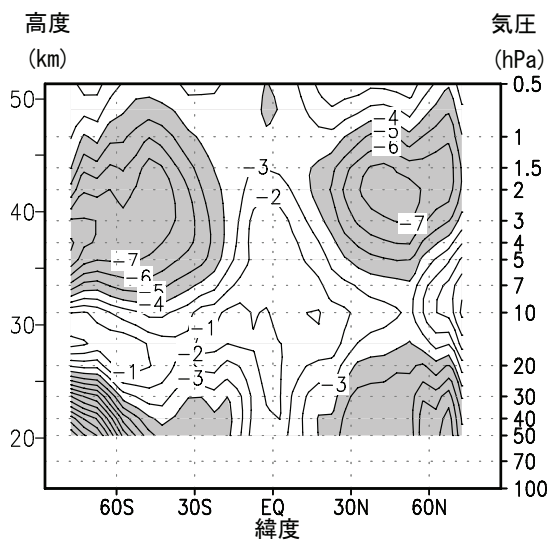


図1-1-7：オゾン長期変化傾向の緯度高度分布

2008年オゾン量の1979年比。EESCフィッティングにより求めた。統計期間は1979年から2003年。等値線間隔は1%。陰影部は減少が-4%を下回る領域。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計算した。NOAA提供の衛星データ（SBUV/2データ）から作成。

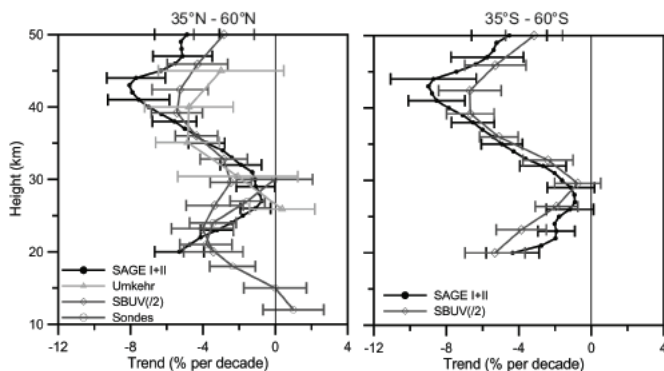


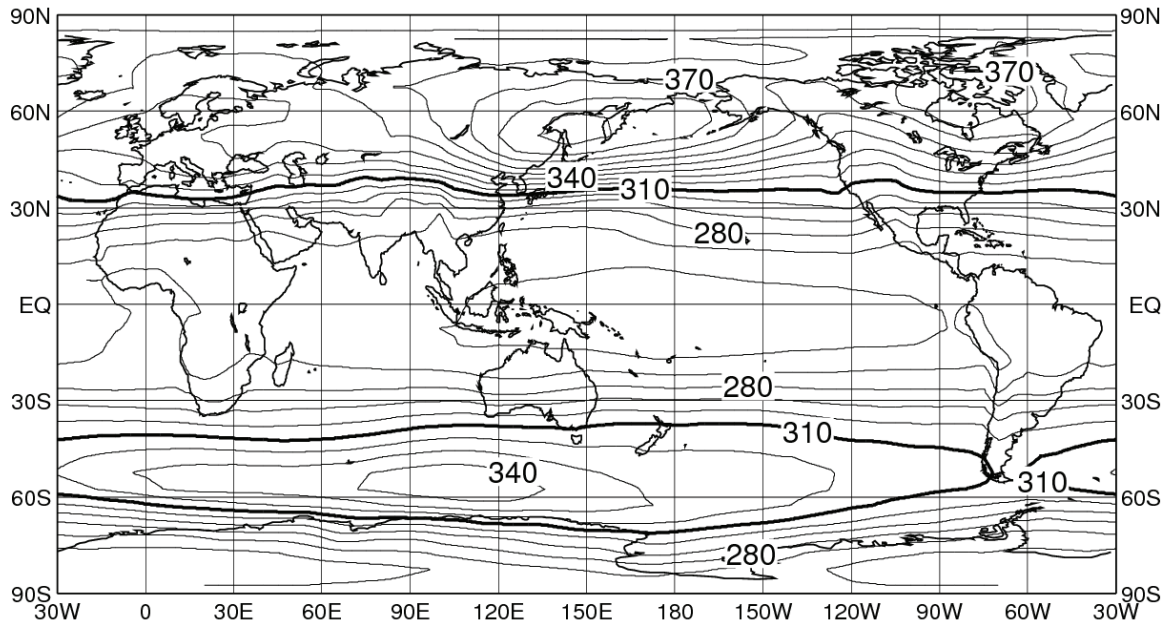
図1-1-8：オゾン長期変化傾向の高度分布

1980～2004年のSAGE I/II、反転観測データ、SBUV/2、オゾンゾンデ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)。

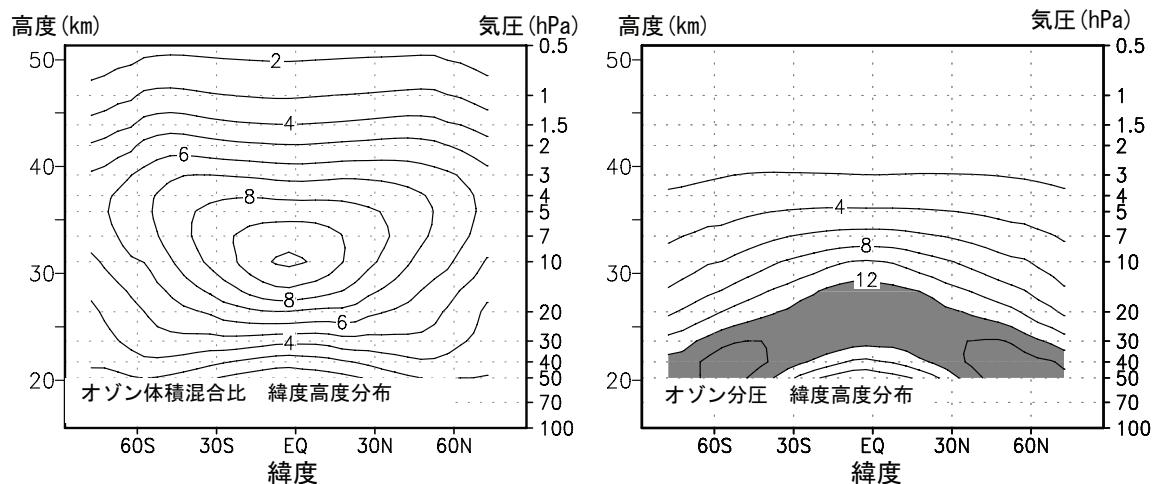
解説 1 オゾンの平均的な分布とその形成メカニズム

オゾンの平均的な分布として、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。特にオホーツク海付近は世界的に最もオゾン全量が多い場所であり、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高度22km付近(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)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)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。



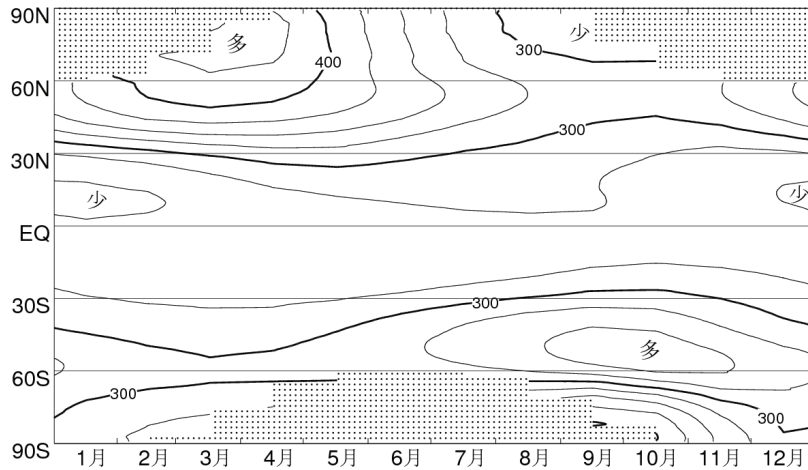
図E1-2：年平均帯状平均オゾン濃度子午面分布（左：体積混合比、右：オゾン分圧）の参照値（1979～1992年の平均値）
等値線間隔は、左：1ppmv、右：2mPa。右の陰影部は12mPa以上の領域。NOAA提供の衛星データ（SBUV/2データ）から作成。

*は「用語解説」(p59～61)を参照。

帯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っている。

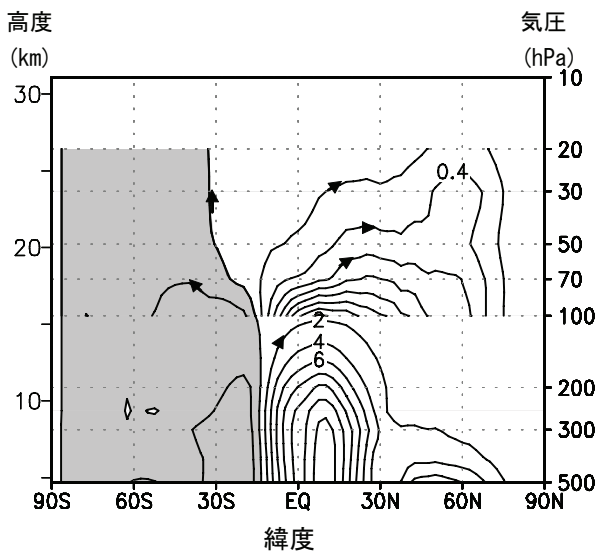
このような平均的なオゾン量の高度・緯度分布や季節変化は、以下に説明するように形成される。

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付近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。日本付近でのオゾン全量の大きな南北傾度はこのためである。



図E1-3：帯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月平均の帯状平均子午面循環

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 (JRA-25* 及び JCDAS*) を用いて作成。

*は「用語解説」(p59~61)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(解説3「トレンド(長期変化傾向)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。

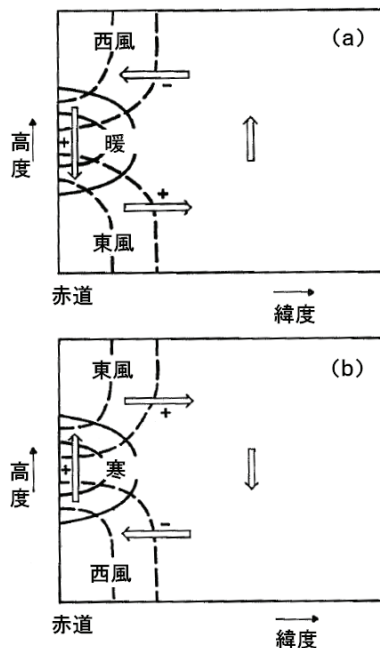
太陽活動の変動にともなって波長が200~250nmの紫外線強度は4~8%変化するので、この波長域の紫外線でオゾンが生成する成層圏界面付近の変動は説明が可能であるが、大半のオゾンが存在する下部成層圏の変動は説明できない。下部成層圏の変動を説明するメカニズムとして次のような力学過程が提案されている。

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をわずかに変える。東風相ではこれと反対の子午面循環(図E2-1 b)が生じる。成層圏のこの高度帯(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。

解説3 トレンド（長期変化傾向）の評価

この報告で採用しているトレンド値の評価方法について説明する。

1) 既知のオゾン全量変動要因と自然変動成分の除去

オゾン全量は様々な要因によって変動する。図E3-1(1)につくばにおける1970年から2008年までのオゾン全量月平均値の推移を示す。月平均値の推移には明瞭な季節変動がみられ、年平均値の20~30%程度の振幅を持っている。この時系列から季節変動成分を取り除いた（方法は後述）オゾン全量の変化を図E3-1(2)に示す。この経年変化には、2~3年や10年程度のほぼ周期的な変動成分が含まれており、オゾンのトレンド（長期変化傾向）を正確に求めるには、季節変動に加え、これらの変動成分をオゾンの時系列データから除去する必要がある（WMO, 1992, 吉松他, 2005）。

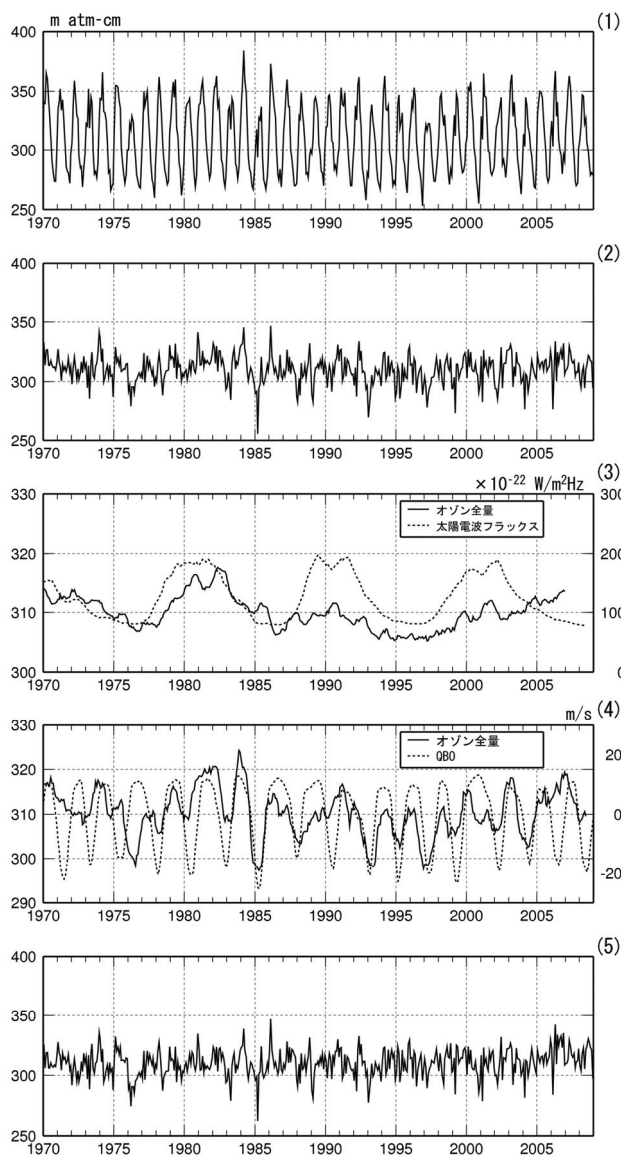
オゾン全量の変動に影響を及ぼす季節変動以外の要素として、約11年周期の太陽活動、約2年周期のQBOがよく知られている。また、大きな火山噴火等で生じる大気混濁もオゾン全量の変動に影響を及ぼす。

さらに、このような自然要因によるもののほかに、大気中のオゾン破壊物質の濃度の変化も人為的要因としてオゾン全量の変動に影響を及ぼす。

これらの変動の時系列データを図E3-2に示す。太陽活動は国立天文台野辺山観測所で観測された太陽電波フラックス（3,750MHz）を13か月移動平均した値を、QBOはシンガポール上空50hPa面の風の東西方向の風速の7か月移動平均値を指標にしている。大きな火山噴火等で生じる大気混濁の影響については、各地点の直達日射量から算出した大気混濁係数の13か月移動平均を指標としている。

また、人為的要因である大気中のオゾン破壊物質の濃度の変化は、EESC（等価実効成層圏塩素）を指標としており、本報告では、解説5「オゾンホール規模の統計的な推定方法」と同じく、「オゾン層破壊の科学アセスメント：1998」で用いられた値を使用した。

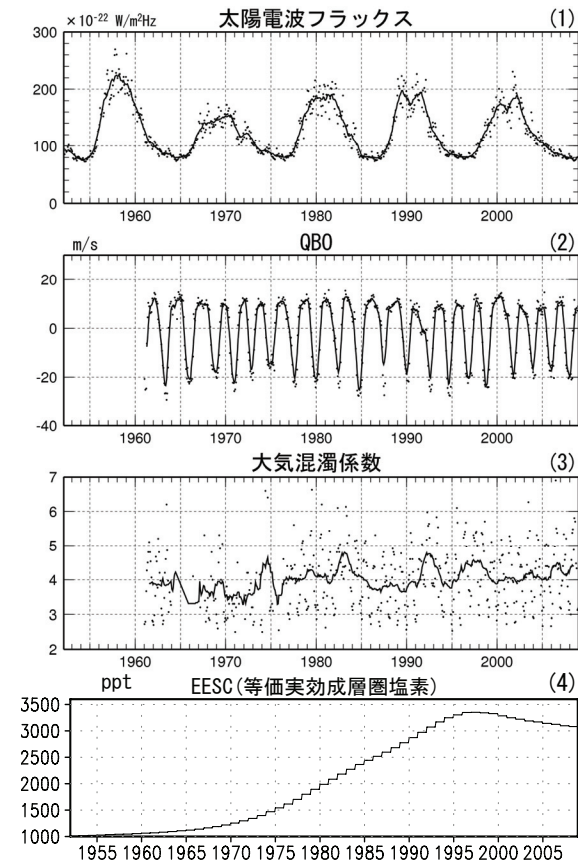
つくばにおけるオゾン全量の1970~2008年の変化と太陽活動による変動との関係を図E3-1(3)に示す。季節変動成分を取り除いたオゾン全量の49か月移動平均（太線）と太陽電波フラックスの13か月移動平均（破線）が1980年代にはよく一致してい



図E3-1：つくばにおけるオゾン全量の変化と各自然変動要因との関係

(1) 月平均値、(2) 季節変動除去値の時系列、(3) 季節変動除去値の49か月移動平均値（太線）と太陽電波フラックスの13か月移動平均値（破線）、(4) 季節変動除去値の13か月移動平均値（太線）とQBOの7か月移動平均値（破線：時間ラグを設定）、(5) 季節変動、太陽活動およびQBOの影響を除去したオゾン全量時系列（太線）。

る。しかし、1990年代以降については整合していない。次に、季節変動成分を取り除いたオゾン全量の13か月移動平均(実線)とQBOの7か月移動平均(破線：時間ラグを設定)を図E3-1(4)に示した。オゾン全量の時系列とQBOの時系列が良く一致していることがわかる。さらに、図E3-1(5)には季節変動を除去したオゾン全量から太陽活動の影響、および、QBOの影響を取り除いた時系列を示す。この時系列は、大気中のオゾン層破壊物質の濃度の変化に伴う変動成分と、未知の要因による変動成分が重なった時系列と考えることができ、この時系列からオゾンのトレンド(長期変化傾向)を求めることになる。



図E3-2：トレンド解析に使用する既知の変動要因

(1) 国立天文台野辺山観測所の太陽電波フラックス(3, 750MHz、単位は $10^{-22} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Hz}$)で、実線は13か月移動平均値。(2) シンガポール上空の50hPa面における風の東西成分(m/s)で、実線は7か月移動平均値。(3) つくばにおける直達日射観測から評価した大気の混濁係数で、実線は13か月移動平均値。(4)トレンド解析で使用したEESC(等価実効成層圏塩素)。

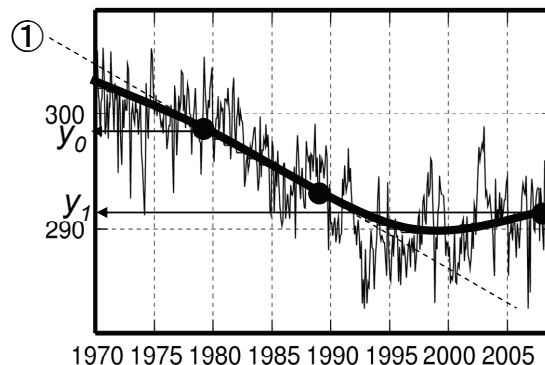
2) EESCフィッティングによるトレンド(長期変化傾向)の評価

従来、自然変動成分を除去した時系列(つくばのオゾン全量であれば図E3-1(5)の時系列)に直線回帰を適用してトレンド(長期変化傾向)を決定していた。しかし、大気中のオゾン層破壊物質の濃度の変化は1990年代にピークを迎え、その後ほぼ一定かわりかな減少傾向を示している。それに伴いオゾンについても1990年代半ばにかけてまで減少がみられたが、その後はほぼ横ばいとなっている。このため、オゾンの1970年代以降の長期変化傾向を評価する手法として直線トレンドを求めることは適切ではなくなっている。

そこで、この報告では自然変動成分を除去した1970年代以降の時系列データに対し、直線回帰を当てはめる代わりに、EESCの変化の関数を当てはめて(EESCフィッティング)解析する方法を用いた。これは時系列データに対して、ある曲線に回帰した解析と考えることができる(実際、EESCの変化を時間に関する逆正規分布を使用して定義している研究もある)。この解析を行うことで、オゾンの経年変化のうちオゾン層破壊物質の影響を受けて変化している成分を抽出することになる。この方法は最近のオゾンに関する統計解析の論文(例えば、Newman *et al.*, 2004, Gullas *et al.*, 2004)でも使用されており、「オゾン層破壊の科学アセスメント：2006」(WMO, 2007)においても採用されている方法である。なお、本報告では、EESCがピークを過ぎた1998年以降の最近の変化傾向を示すため、1998~2008年のデータから直線回帰により求めた変化傾向も併用して示している。

自然変動要因による変動成分を除去した世界の地上観測によるオゾン全量月平均値の時系列をEESCフィッティング曲線とともに、模式的に図E3-3に示す。

本報告で示したオゾンの1970年代以降の長期変化傾向は、このEESCフィッティング曲線を基準に評価している。本文中でトレンド（長期変化傾向）の評価にあたり「EESCフィッティングによる1979年を基準とした2008年オゾン量の比は-x%」あるいは「EESCフィッティングを用いた2008年オゾン量の1979年比」という表現を使用している。この値は、フィッティング曲線上の2008年の値(y_1)と1979年の値(y_0)との差の百分率 ($(y_1 - y_0) / y_0 * 100(\%)$)を示している。他にも1979年から1989年における変化量（「1980年代における変化量」と表現）を [%/10年]の単位で示している図もあり、この「1980年代における変化量」とは図E3-3における①の線の傾きに相当する。こちらの表現方法は「オゾン層破壊の科学アセスメント：2006」で使用されている方法であり、1979年から1989年にEESCがほぼ線形の変化をしているため、用いられている。



図E3-3：EESCフィッティングによるトレンド解析

自然変動要因による変動成分を除去した世界の地上観測によるオゾン全量月平均値とEESCフィッティング曲線を模式的に示したもの。本文中では主に $(y_1 - y_0) / y_0 * 100(\%)$ の値を用い、「1979年を基準とする2008年の比は-x%」と表現した。また、①の傾きを「1980年代の変化量」と表現している箇所もある。

3) 実際の計算の手順

実際の観測データから、各自然変動成分を除去した時系列データを求める手順は以下のとおりである。

- 1) オゾン全量の月平均値から月別累年平均値を差し引き、全期間の平均値を加えることにより、季節変動を除去した時系列データを作成する。
- 2) オゾン全量の季節変動除去した値を目的変数とし、太陽電波フラックスの13か月移動平均値とQB0の7か月移動平均値（いずれも地点ごとにオゾン全量との相関が最も高くなるように時間ラグを設定）、およびトレンド成分を説明変数とした重回帰式を求める。
- 3) この回帰式を用いて、太陽の活動を示す太陽電波フラックスおよびQB0の変動と対応するオゾン全量の成分を算出し、目的変数からこれらの成分を除去した時系列を作る。

EESC関数を当てはめてトレンド（長期変化傾向）を求める具体的な方法を以下に示す。

オゾン量を y 、EESCを x とし、オゾン量がEESCに対して線形の関係があると仮定すると、 $y = a \cdot x + b$ と表すことになる。オゾン量の変化に対してEESC関数をフィッティングさせることは、データ X_i, Y_i に対して最適となる係数 a, b を求めることである。それには、 $\epsilon_i = Y_i - (a \cdot X_i + b)$ としたとき、 $\sum \epsilon_i^2$ が最小となるように a, b （の推定量）を

$$a = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}$$

$$b = \bar{Y} - a \cdot \bar{X}$$

として求めれば良い。ただし、 $\bar{X} = \sum X_i / n$ 、 $\bar{Y} = \sum Y_i / n$ 、(n はデータ数)である。

この回帰係数 a の95%信頼区間は、 $t_{0.05}$ を自由度 $\nu = n - 2$ に対するt分布の5%値とすると、

$$a \pm t_{0.05} \cdot (1 - r^2)^{1/2} \cdot \sigma_y / \sigma_x / (n - 2)^{1/2}$$

と求めることができる。ただし、 $r = C_{xy} / \sigma_x / \sigma_y$ は相関係数であり、 $\sigma_x^2 = \sum (X_i - \bar{X})^2 / n$ 、 $\sigma_y^2 = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 / n$ 、 $C_{xy} = \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) / n$ である。

信頼区間の全てが負（あるいは正）である場合を統計的に有意であるとした。1980年代におけるトレンド（長期変化傾向）およびその95%信頼区間は、係数 a および95%信頼区間に1980年代のEESC増加量をかけることで算出した。

なお、1998～2008年の変化量については、各自然変動成分を除去した1998～2008年のデータのみを用い、直線回帰を行って求めた。