

付録

付録1 解析に使用した観測資料

付録1-1 オゾンの地上観測データ

本報告で使用した地上観測データは、2007年1月までに、世界気象機関（WMO）の世界オゾン・UV データセンター（WOUDC、カナダ・トロント）に登録されているオゾン全量、オゾン反転、オゾンゾンデ観測データである。2002年から2006年の間にオゾンの観測を行っている地点を図A1-1に示す。また、気象庁が観測しているデータについて表A1-1にまとめた。

オゾン全量観測データおよび反転観測データ：

気象庁はドブソンオゾン分光光度計（以下ドブソン計）によるオゾン全量観測およびオゾン高度分布観測（反転観測*）を1957年につくばで、1958年に札幌および鹿児島で、1974年に那覇で、1961年に南極昭和基地で開始し、現在、つくば、札幌、那覇および昭和基地で観測を行っている。

また1994年から南鳥島においてブリューワー分光光度計によるオゾン全量観測を実施している。

オゾンゾンデ観測データ：

気球を用いたオゾン高度分布観測（オゾンゾンデ観測）を1968年に札幌、つくば、鹿児島で、1989年に那覇で、1967年に南極昭和基地で開始し、現在、つくば、札幌、那覇および昭和基地で観測を行っている。

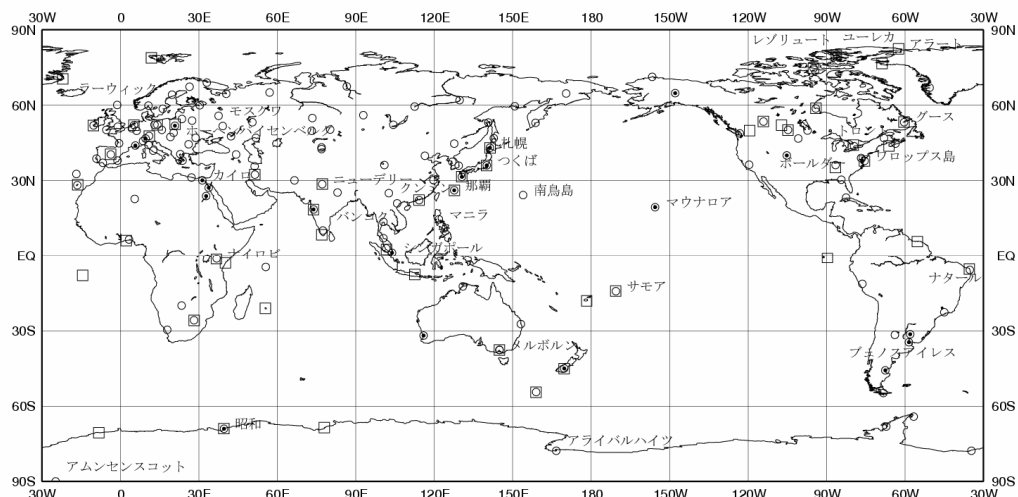


図 A1-1：オゾン観測地点の分布（2002-2006年）

全量観測は143地点（○印）、反転観測は21地点（●印）、オゾンゾンデ観測は51地点（□印）。

表 A1-1：観測地点と位置および観測種別 本報告に使用した地上観測データのうち、気象庁の地上観測地点の位置および観測種別（鹿児島の観測は2005年3月まで）。

観測所名	Stations	地点番号 WMO Index No.	緯度 Latitude	経度 Longitude	高度 Elevation	観測種別 Observation Type
札幌	Sapporo	47412	43° 04' N	141° 20' E	26.3m	T,U,S,UV
つくば(館野)	Tsukuba(Tateno)	47646	36° 03' N	140° 08' E	31.0m	T,U,S,UV
鹿児島	Kagoshima	47827	31° 33' N	130° 33' E	31.7m	T,U,S,UV
那覇	Naha	47936	26° 12' N	127° 41' E	27.5m	T,U,S,UV
南鳥島	Minami-torishima	47991	24° 17' N	153° 59' E	8.5m	T,U
昭和基地	Syowa	89532	69° 00' S	39° 35' E	21.8m	T,U,S,UV

T：オゾン全量観測、U：反転観測、S：オゾンゾンデ観測、UV：波長別紫外線観測

*は「用語解説」を参照

付録1-2 オゾンの衛星観測データ

衛星による観測データとしては、ニンバス-7、メテオール-3、アースプローブの三基の衛星のオゾン全量マッピング分光計 (TOMS ; Total Ozone Mapping Spectrometer) のデータと、オーラ衛星のオゾン監視装置 (OMI ; Ozone Monitoring Instrument) のデータを使用した。なお、ニンバス-7衛星とメテオール-3衛星のデータについては、アースプローブ衛星に用いられている最新の処理方法 (ver. 8) で計算されたものを利用した。

また、オゾンの鉛直分布については、太陽光後方散乱紫外線計 (SBUV/2 ; Solar Backscatter UltraViolet) による 1979 年から 2003 年までのデータを使用した。

ニンバス-7 衛星データ : 米国航空宇宙局 (NASA ; National Aeronautics and Space Administration)、
1978 年 11 月～1993 年 4 月

メテオール-3 衛星データ : ロシア、1993 年 5 月～1994 年 11 月

アースプローブ衛星データ : NASA、1996 年 7 月～2004 年 12 月

オーラ衛星データ : NASA、2005 年 1 月～

また、メテオール-3 衛星以後アースプローブ衛星による観測が始まるまでの一部の期間、およびオゾンの長期変化に関連した解析の一部については、以下のデータを使用した。

ノア衛星データ : 米国海洋大気庁 (NOAA ; National Oceanic and Atmospheric Administration) のタイロス実用型鉛直サウンダ (TOVS ; TIROS Operational Vertical Sounder) の高分解能赤外放射計による全球のオゾン全量データおよび SBUV/2 による全球のオゾン全量データ。

TOMS+SBUV/2 統合データ : 米国航空宇宙局 (NASA) が複数の衛星データから処理した全球のオゾン全量および鉛直分布データ。ニンバス-7 衛星の TOMS および SBUV データ、ノア衛星の SBUV/2 データ、アースプローブ衛星の TOMS データを利用している。MOD (Merged Ozone Data) データともいう。

表 A1-2 : 解析に用いた衛星データ

衛星名	ニンバス-7	メテオール-3	アースプローブ	オーラ	ノア	ノア
観測装置名	TOMS	TOMS	TOMS	OMI	TOVS	SBUV/2
期間	1978.11- 1993.4	1993.5- 1994.11	1996.7- 2004.12	2005.1-	1995	1995

衛星観測によるオゾン全量観測データの精度の検証

現在使用しているオーラ衛星に搭載されている OMI のオゾン全量観測データの精度を確認するために図 A1-2 に、地上観測値との比偏差*を、2006 年 1～12 月の 1 年間について求めたものを示す。これによれば、北半球低緯度 (赤道～北緯 30 度) で正偏差がやや大きくなっており、その大きさは最大で 8% 程度である。その他の領域では、OMI データと地上観測データはほぼ一致している。

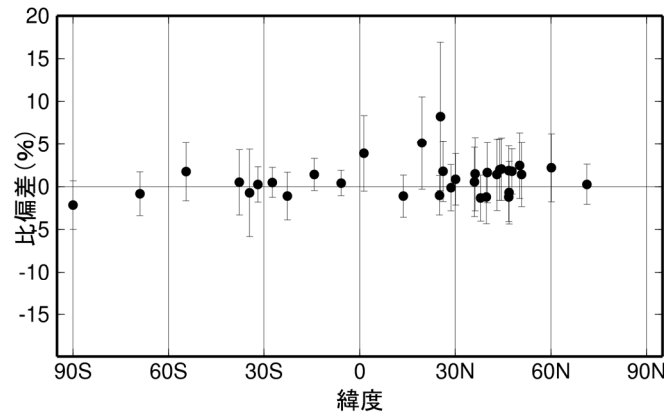


図 A1-2 : オーラ/OMI のデータと地上観測データの比較

オーラ衛星に搭載された OMI による観測値 (日別) と地上観測値との比偏差。地上の観測地点に対応する OMI データを求め比較した。データ期間は 2006 年 1～12 月。縦線はその標準偏差。

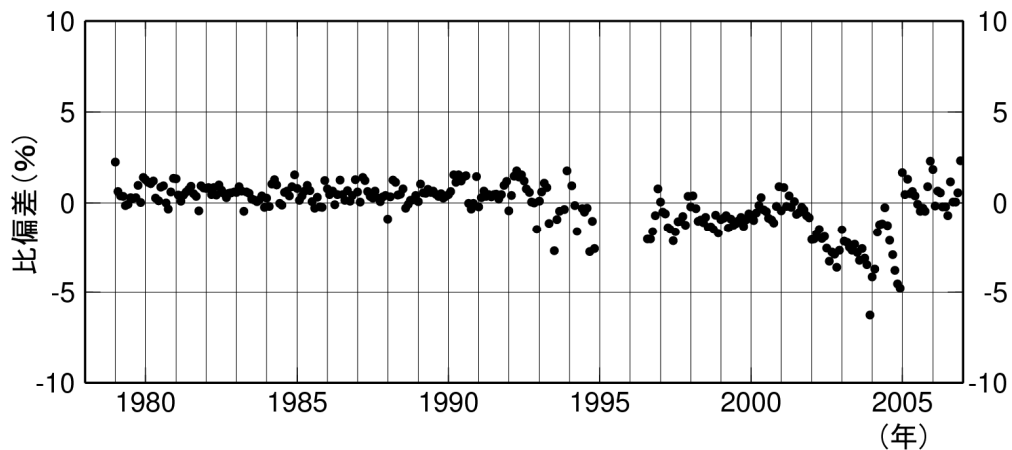


図 A1-3 : 衛星データと地上観測データの比較

北半球中緯度 (北緯 30～60 度) の TOMS および OMI による観測値 (月平均) と地上観測値との比偏差の推移。地上の観測地点に対応する衛星データを求め比較した。データ期間は 1979 年 1 月～2006 年 12 月。各月の比較地点数は約 20～50 地点。

衛星データの長期的な安定性をみるために、図 A1-3 に 1979 年 1 月～2006 年 12 月の期間について、TOMS および OMI による観測値と、北緯 30 度から北緯 60 度の領域にある地上の観測所の観測値との月平均値による比較結果を示す。これによれば、1979 年から 1993 年のニンバス-7 衛星の TOMS データの地上観測値に対する比偏差は、全体的には正を示しており、その大きさは 1% 程度である。1993 年 5 月以降のメテオール-3 およびアースプローブ衛星の TOMS データの比偏差は、ばらつきが大きく概ね負を示している。特に、2002 年以降のアースプローブ衛星の TOMS データは、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だった。TOMS の後継として OMI のデータが公開されており、図 A1-3 に示すように TOMS データと比較して地上観測値との偏差のばらつきが同程度であることから、OMI データによってオゾンの長期的な変化を正確に見積もることができると考えられる。このため、本報告では、2005 年 1 月より OMI データを利用している。

* は「用語解説」参照

付録1-3 紫外線の観測データ

波長別紫外線観測データ

紫外線（紫外域日射）は波長により、A領域（UV-A;波長315～400nm（nm：ナノメートル=10億分の1メートル））、B領域（UV-B;波長280～315nm）、C領域（UV-C;波長100～280nm）に区分される。気象庁では、オゾン層と密接な関連があり、生物に有害なB領域紫外線の地表到達量の状況を把握するために、1990年1月よりつくばで、1991年1月より札幌、鹿児島、那覇で、ブリューワー分光光度計を用いた波長別の紫外線観測を開始し、現在、札幌、つくば、那覇において観測を実施している。観測している波長域は、地表に到達し、かつオゾン量に依存して大きく変化する範囲を中心とする290nmから325nmまでである。なお、国内観測網の見直しにより、鹿児島での観測は2005年3月で終了した。また、気象庁は国立極地研究所（大学共同利用機関法人）と共同で、南極昭和基地で1991年2月から試験的に観測を開始し、1994年2月からは本格的な定常観測を実施している。なお、つくばと昭和基地では広帯域紫外域日射計によるUV-B量も同時に測定している。

紅斑紫外線量とUVインデックス

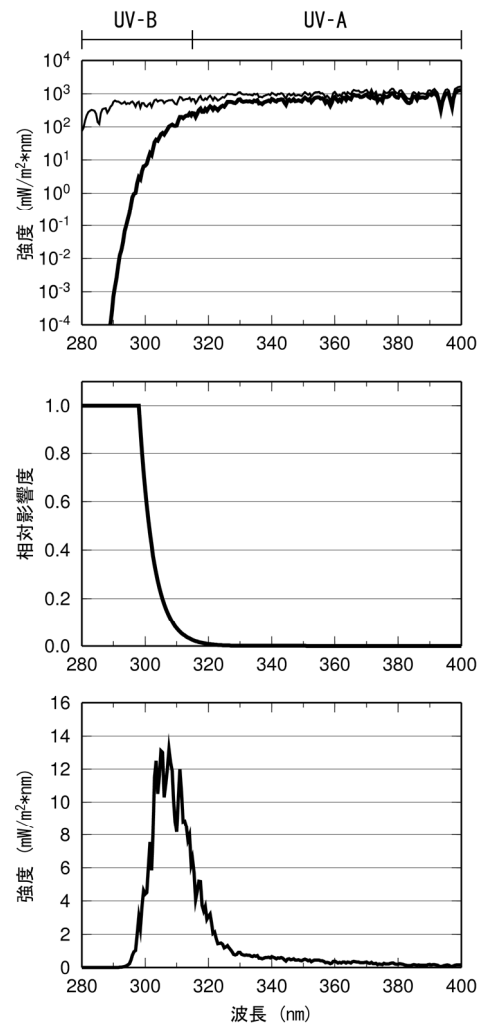
本報告では、観測された波長別紫外線データを、紅斑紫外線量（CIE紫外線量）およびUVインデックスに換算して示す。

紫外線の大气外および晴天時の地表での波長別の強度を図A1-4（上図）に示す。地表での紫外線が短波長ほど大きく減衰しているのは、主に成層圏オゾンの吸収や大気分子による散乱の影響である。

「紅斑紫外線量」は、紫外線の人体への影響度が短波長側で強いという特徴を考慮して、波長別の紫外線強度に、皮膚に対する波長別の相対影響度として国際照明委員会（CIE;Commission Internationale de l' Eclairage）により定義されたCIE作用スペクトル（McKinlay and Diffey, 1987）を乗じて、波長積分して得られる量である（図A1-4）。その日の積算値を「紅斑紫外線量日積算値」とする。また、紅斑紫外線量を25mW/m²単位で指標化したものが「UVインデックス」である。

紅斑紫外線量の算出にあたって、観測を行っていない325nmから400nmまでの波長域による寄与分については、324nmの観測値をもとに推定している。これは、324nmから400nmの波長域の紫外線が、オゾンによる吸収をほとんど受けず、雲やエアロゾルの影響によって、波長にあまり依存せずほぼ一様に変動することを根拠としている。

なお、2005年5月からは紫外線予測情報と、オゾン全量や気象データをもとに推定して求めた紫外線解析情報ならびに札幌、つくば、那覇における紫外線観測結果をウェブサイト上で毎日公表している。



図A1-4：波長別紫外線強度と紅斑紫外線強度の関係

上図は放射伝達モデル（Aoki et al., 2002）を用いて算出した波長別紫外線強度（細線：大気圏外、太線：地表）、中図はCIE作用スペクトルの相対影響度、下図は波長別紅斑紫外線強度を示す。横軸は波長。波長別紅斑紫外線強度を波長積分すると紅斑紫外線量が得られる。この図から求めた紅斑紫外線量をUVインデックスに換算すると8.6となる。

付録2 EESCフィッティングによるトレンドの評価

本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。札幌、つくば、那覇における観測開始から2006年12月までのオゾン全量の月平均値の推移を図A2-1に示す。月平均値には年平均値の20~30%の幅の季節変動がみられる。月平均値から季節変動成分を除くことで図A2-2に示すオゾン全量の経年変化が得られる。オゾン量の経年変化には2~3年や10年程度のほぼ周期的な変動成分が含まれている。信頼度の高いオゾントレンドを求めるため、これらの変動と相関の高い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)。

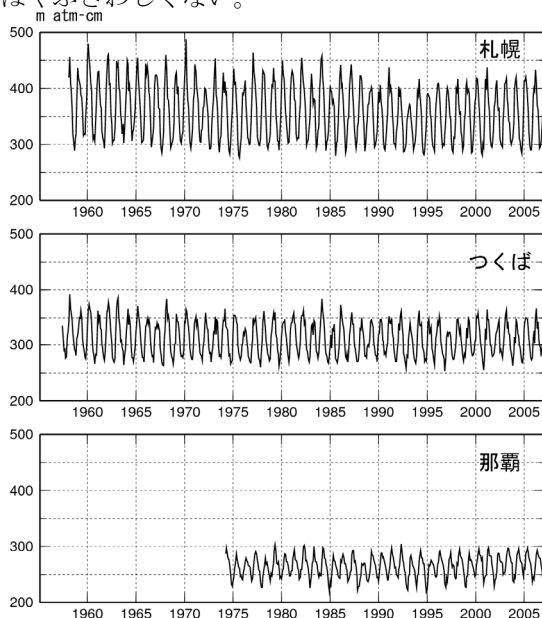
図A2-3に長期変化傾向の解析(トレンド解析)において使用する既知の変動の時系列を示す。トレンド解析を行うにあたり除去する自然変動要因として、約11年周期の太陽活動(1)、約2年周期のQBO*(2)があり、また、反転観測では、大きな火山噴火等で生じる大気混濁の影響による測定誤差を評価するため、直達日射量から算出した大気混濁係数(3)も考慮する必要がある。

例として、つくばにおけるオゾン全量の1970~2006年の変化と各変動要因との関係を図A2-4に示す。(1)は解析対象のオゾン全量の月平均値、(2)はオゾン全量の月平均値の49か月移動平均値と太陽活動の目安となる太陽電波フラックス(3, 750MHz)値の13か月移動平均値、(3)はオゾン全量から季節変動と太陽活動に依存する変動成分を取り除いた値とQBOの指標となるシンガポール上空50hPa面の風の東西方向の風速の7か月移動平均値、(4)はこれらの変動成分を除いて残ったオゾン全量の変化である。

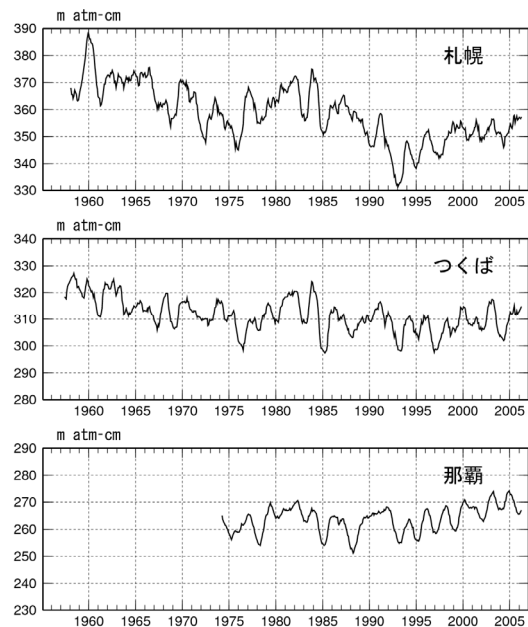
各変動成分を除去した時系列データを求める実際の手順は以下のとおりである。

- 1) オゾン全量の季節変動除去値の時系列を目的変数とし、太陽電波フラックスの13か月移動平均値とQBO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)、および直線トレンド成分を説明変数とした重回帰式を求める。
- 2) 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QBOの変動と対応するオゾン全量の成分を算定し、目的変数からこれらの成分を除去した時系列を作る。

従来の観測報告ではこの時系列に直線回帰を適用してトレンド(通年および季節・月別)を決定していた。しかし、長期的なオゾン減少をもたらした塩素濃度が1990年代にピークを迎え、それにともないオゾンの減少も底をついている現状では、オゾン減少量を評価する手法として直線トレンドを求めることははやぶさわしくない。

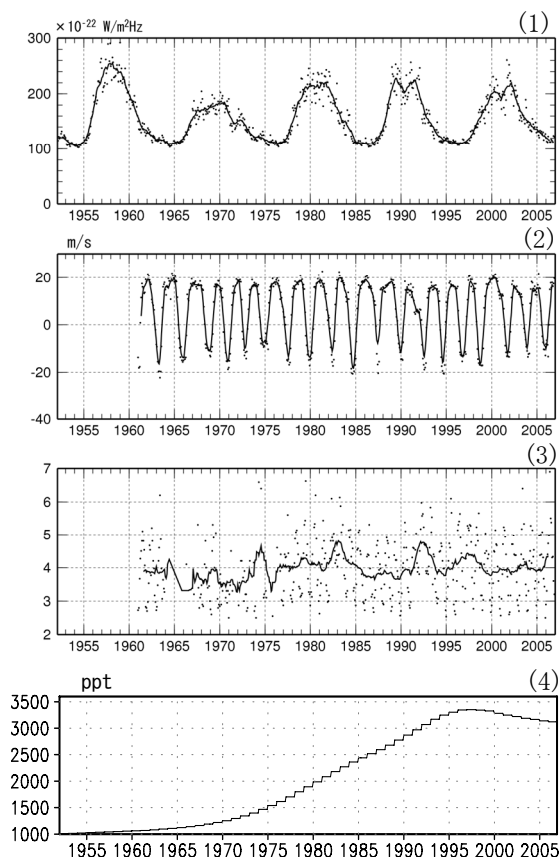


図A2-1: 日本上空のオゾン全量の月平均値
札幌、つくば、那覇についての観測開始から2006年12月までのオゾン全量の月平均値。



図A2-2: 季節変動除去後のオゾン全量の推移
図A2-1のデータから季節変動を除去した後、13か月移動平均した。

* は「用語解説」参照



図A2-3：トレンド解析に使用する既知の変動要因

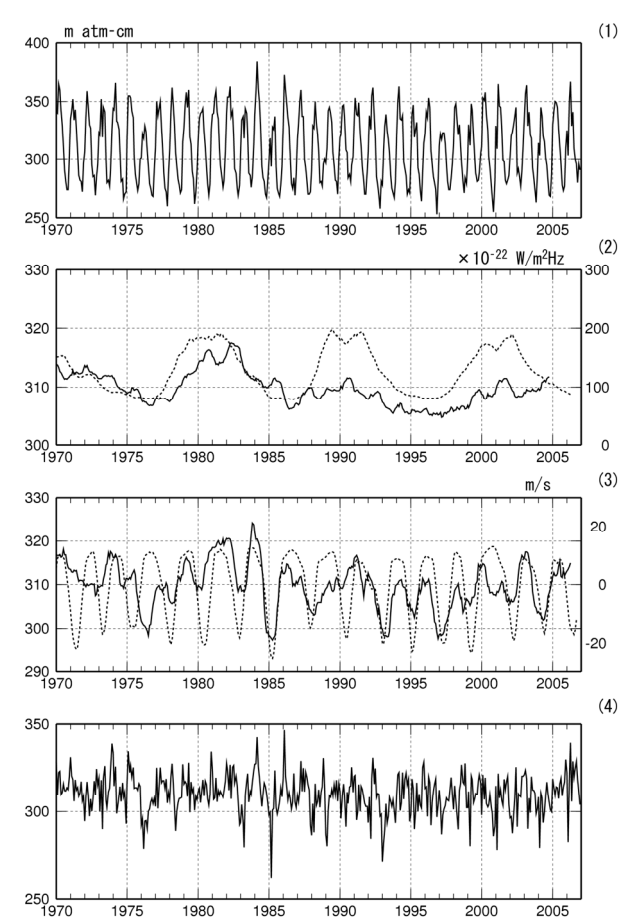
(1) 国立天文台野辺山観測所の太陽電波フラックス (3, 750MHz, 単位は $10^{-22} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Hz}$) で、実線は 13 か月移動平均値。(2) シンガポール上空の 50hPa 面における風の東西成分 (m/s) で、実線は 7 か月移動平均値。(3) つくばにおける直達日射観測から評価した大気の大気混濁係数で、実線は 13 か月移動平均値。(4) トレンド解析で使用した EESC (等価実効成層圏塩素)。

成層圏でオゾン層破壊をもたらすオゾン層破壊物質の濃度の指標としてEESC* (等価実効成層圏塩素) が定義されている。成層圏オゾンの経年変化には、オゾン層破壊物質の影響で変化する成分があり、Danielら (1995) は、オゾン全量の長期変化が、大まかにEESCと比例関係にあることを示している。

そこで、オゾンの経年変化を評価する方法として時系列データに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解析する方法が考えられる。この方法により、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評価することができる。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、EESC関数を当てはめて解析する方法が使用されている。2006年の「オゾン層破壊の科学アセスメント2006」(WMO, 2006) においてもEESC関数を当てはめて解析する方法が採用されており、本報告でもこの方法を使用することとした。

本報告で示したオゾントレンドは、オゾンの時系列データにEESC関数 (図A2-3(4)参照) を当てはめて (EESCフィッティング) 解析を行ったのち、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) を求めて示した。これは「科学アセスメント2006」と同様の表現方法であり、1979年から1989年におけるEESCがほぼ線形の変化をしているため、このような方法が用いられている。1979年を基準とする2005年の正味の変化量は、1979年から1989年における変化量の約1.4倍として換算でき、例えば、1980年代の10年間の変化量が-5%であった場合、1979年を基準とする2005年の正味の変化は-7%である。

*は「用語解説」を参照



図A2-4：つくばにおけるオゾン全量の変化と各変動要因との関係

(1) 月平均値、(2) 月平均偏差の 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)、(3) 月平均値から季節と太陽活動の影響を取り除いた時系列の 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)、(4) 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)。

EESC関数を当てはめて変化量（トレンド）を求める具体的な方法は以下のとおり。

オゾン量を y 、EESCを x とし、オゾン量がEESCに対して線形に変化すると仮定すると、 $y=a \cdot x + b$ の関係となる。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 にたいして最適となる係数 a 、 b を求めることである。それには、 $\varepsilon_i = Y_i - (a \cdot X_i + b)$ としたとき、 $\sum \varepsilon_i^2$ が最小となるように a 、 b （の推定量）を

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

$$b = Y - a \cdot X$$

として求めればよい。ただし、 $X = \sum X_i / n$ 、 $Y = \sum Y_i / n$ 、 $(n$ 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、

$$a \pm t_{0.05} \cdot \text{sqrt}(1 - r^2) \cdot \sigma_y / \sigma_x / \text{sqrt}(n - 2) \quad (\text{sqrt}() \text{ は平方根})$$

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、 $\sigma_x^2 = \sum (X_i - X)^2 / n$ 、 $\sigma_y^2 = \sum (Y_i - Y)^2 / n$ 、 $C_{xy} = \sum (X_i - X)(Y_i - Y) / n$ 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年代における変化量（トレンド）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。

EESC関数にはいろいろな定義方法があるが、本報告では、解説4「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」で紹介されたものを使用した。

付録3 観測装置の較正体制

1) オゾン全量観測

気象庁はアジア地区のドブソンオゾン分光光度計によるオゾン全量観測について、WMOの較正センター業務を行っている。そのため高層気象台（つくば）においてドブソンオゾン分光光度計のアジア地区の地区準器を所有し、その維持・管理を行っている。この地区準器は、アジア地区のオゾン観測網の観測データの精度維持のためほぼ3年に一度米国海洋大気庁（NOAA）が保有しているWMOの世界準器と比較観測を実施している。世界準器の較正は米国ハワイ・マウナロア観測所においてラングレー法を用いた絶対検定により行われている。最近の相互比較観測は2004年に米国・ボールドーで実施した。その際の地区準器の観測精度は、オゾン全量値で世界準器との差は平均して0.0%であり、前回2002年の国際比較以後3年間の観測データについては、補正処理なしで使用できることが確認された。

国内3観測所（札幌、つくば、那覇）のドブソンオゾン分光光度計については、3年に1度、アジア地区準器と比較較正を行った移動準器との比較観測を実施し、観測精度の維持を図っている。南極の昭和基地のドブソン分光光度計については、高層気象台のアジア地区準器で比較較正を行った測器を通常3年ごとに持ち込んで交換し観測に使用している。3年以上継続して同一測器で観測を行う場合には、高層気象台で比較較正を行った測器を昭和基地に持ち込み、観測に使用している測器との比較観測を実施することにより、精度の維持を図っている。また、国内観測所と同様に各種点検も行っている。南鳥島のブリューワー分光光度計については、年1回高層気象台でドブソン分光光度計のアジア地区準器により比較較正した測器を持ち込んで比較観測を実施し、観測精度の維持を図っている。

2) 紫外線観測

現時点では、ブリューワー分光光度計を用いた紫外線観測の較正方法について、国際的に確立した方法はない。気象庁では、ブリューワー分光光度計の測器定数をNISTランプ（米国国立標準技術研究所（NIST）の検定証つきの標準ランプ）照度を基準にして定めている。また、高層気象台では、このNISTランプにより値付けした国内準器を維持・管理している。WMOの枠組みによる国際比較は現時点では実施されていないので、ブリューワー分光光度計の開発を行ったカナダ気象局との間で、二国間の技術協力として相互比較を実施している。直近の比較観測は2006年にカナダ・トロントで実施している。その比較観測の結果によれば、カナダと日本の準器による観測値の差は3%程度であった。

国内3観測所（札幌、つくば、那覇）のブリューワー分光光度計については、ほぼ3年に1度、国内準器との比較観測などによる較正を実施し、観測精度の維持を図っている。

南極の昭和基地のブリューワー分光光度計については、高層気象台の国内準器で比較較正を行った測器を通常3年ごとに交換して観測に使用している。3年以上継続して同一測器で観測を行う場合には、高層気象台で比較較正された測器を昭和基地に持ち込み、観測に使用している測器との比較観測を実施することにより、精度の維持を行っている。