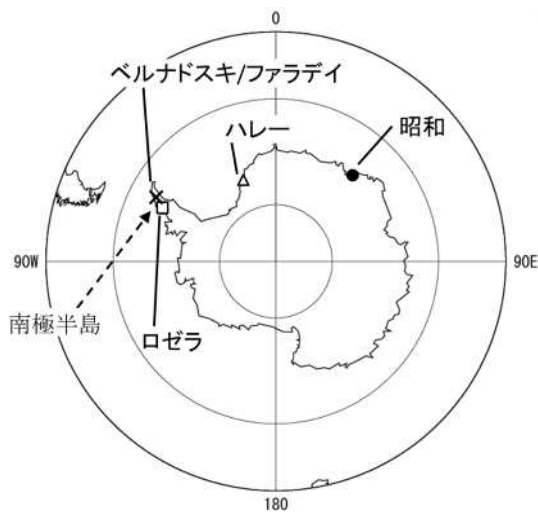
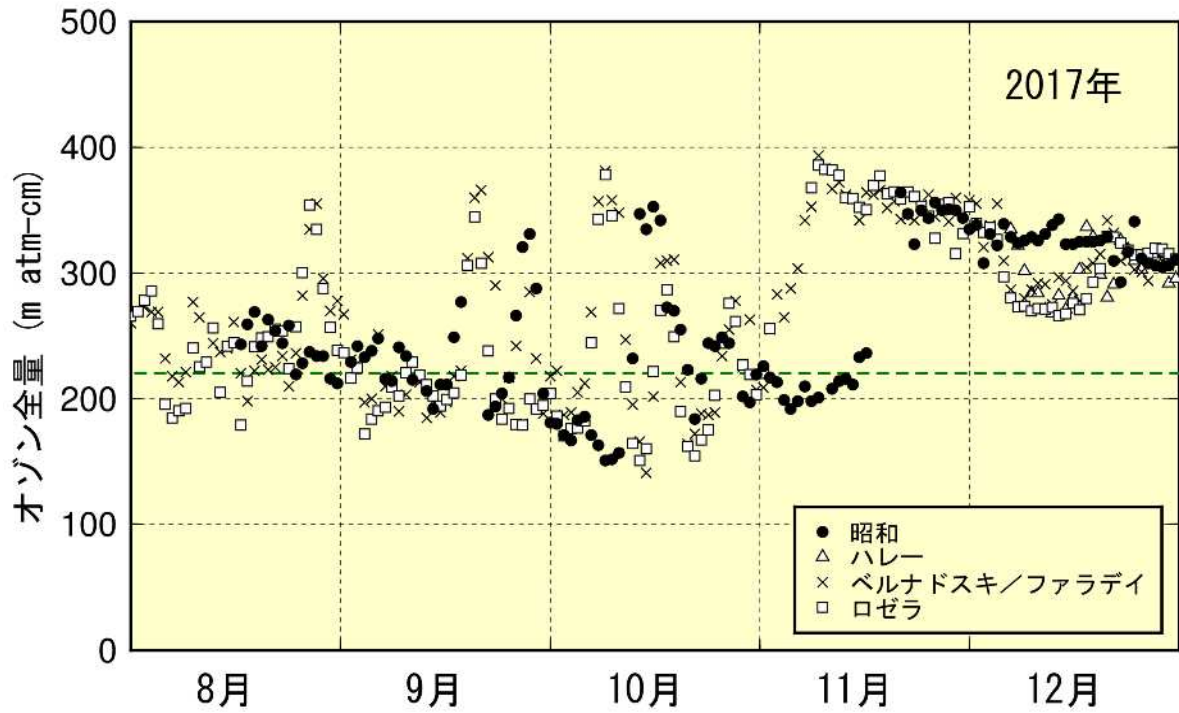


資料

資料 南極各国基地におけるオゾン全量 (2017年)



図S-1：南極各国基地におけるオゾン全量 (2017年)

昭和基地 (●印)、ハレー (△印)、ベルナドスキ/ファラデイ (×印)、ロゼラ (□印) における2017年8～12月のオゾン全量。ハレー、ベルナドスキ/ファラデイ、ロゼラの観測値は英国南極研究所提供。オゾンホールを目安とする220 m atm-cmを緑破線で示した。

付録

付録1 解析に使用した観測資料

付録1 - 1 地上観測データ (オゾン)⁷

この報告で使用した地上観測データは、世界気象機関 (WMO) の世界オゾン・紫外線資料センター (WOUDC、カナダ・トロント) に登録されている 2016 年 12 月までのオゾン全量観測、オゾン反転観測、オゾンゾンデ観測データである。2012~2016 年のオゾン観測データが、WOUDC に登録されている地点を図 A1-1 に示す。

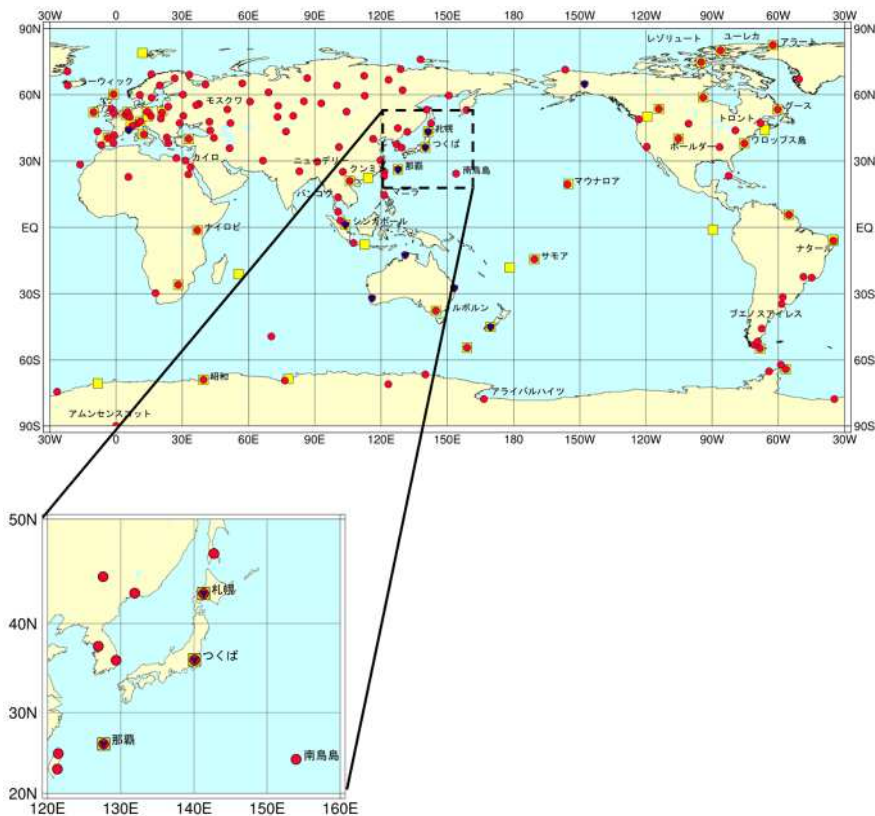


図 A1-1 : オゾン観測地点の分布 (2012~2016 年)

【上図】全量観測は 151 地点 (印)、反転観測は 11 地点 (印)、オゾンゾンデ観測は 52 地点 (印)

【下図】日本周辺域の拡大図。

オゾン全量観測データ及び反転観測データ :

気象庁のドブソンオゾン分光光度計によるオゾン全量観測及びオゾン高度分布観測 (反転観測) の開始は、1957 年つくば、1958 年札幌及び鹿児島、1961 年南極昭和基地、1974 年那覇である (鹿児島での観測は 2005 年 3 月に終了した)。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。南鳥島の 2017 年のオゾン全量データは速報値である。なお、各地点の反転観測データについては、測定データの不確実性の再評価を行い、オゾンプロファイルの最新導出アルゴリズムで処理 (Miyagawa *et al.*, 2009) したものを利用した。

⁷ オゾン観測の測器・原理については、下記の気象庁ホームページを参照のこと。
http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-15ozone_observe.html

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1966年に南極昭和基地で、1968年に札幌、つくば、鹿児島で、1989年に那覇で開始した（鹿児島での観測は2005年3月に、札幌と那覇の観測は2018年1月に終了した）。なお、札幌とつくばでは2009年12月、那覇では2008年11月、南極昭和基地では2010年4月に、オゾンゾンデをKC型からECC型へ変更した。

【KC型からECC型オゾンゾンデの変更にともなう補正について】

これまで、オゾンゾンデに関する国際比較実験（JOSIE1996（WMO, 1998）、JOSIE2000（WMO, 2004）、BESOS2004（Deshler *et al.*, 2008））によって、KC型とECC型の比較実験が実施されており、両者の出力するオゾン分圧には系統的な差があることが報告されている。また、気象庁が実施した両者比較実験でも、同様な差があることがわかっている。これらによると、KC型では、下部対流圏においてオゾンが実際の値よりも過少評価されており、ECC型に比べて少なくなる傾向（バイアス）がある。このため、図1-6、図1-11において、オゾン分圧の1994～2008年の累年平局値で使用されるKC型データのバイアスを補正したうえで比較している（表A1-1）。

表 A1-1： KC 型データの指定気圧面別の補正係数

気圧（hPa）	1000	925	850	700	600	500～1
補正係数	1.18	1.15	1.13	1.08	1.04	1.00

付録1 - 2 地上観測データ（紫外線）⁸

気象庁では、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、1990年1月よりつくばで、1991年1月より札幌、鹿児島、那覇で開始した（鹿児島での観測は2005年3月に、札幌と那覇での観測は2018年1月に終了した）。これは、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（UV-B）の地表到達量の状況を把握するためである。観測している波長域は、地表に到達し、かつオゾン量の変動の影響を受けて大きく変化する範囲を中心とする290 nm から325 nm までである。また、気象庁は国立極地研究所と共同で、南極昭和基地で1991年2月から研究観測を開始し、1994年2月からは気象庁が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 全量も同時に測定している。

なお、気象庁における波長別の紫外線観測は世界でも先駆的であり、当初、較正方法が確立されていなかった。このため、第2章の「図2-15 紅斑紫外線量の年積算値の経年変化」及び「図2-16 日最大UVインデックスが8以上となった日の年間出現日数の経年変化」の計算では、札幌とつくばの一部の期間については、紫外線の観測データと全天日射量等の気象要素との比較検討に基づいて次のような補正量を適用している。

- ・ 札幌 観測開始～1994年1月 -5 %
- ・ つくば 観測開始～1997年12月 +5 %

⁸ 紫外線観測の測器・原理については、下記の気象庁ホームページを参照のこと。
http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/3-45uvb_observe.html

付録1-3 衛星観測データ（オゾン）

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3機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）のデータを主に使用した。ニンバス7とメテオール3両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処理方法（ver. 8）で計算されたものを利用した。また、アースプローブ衛星のTOMSデータは2007年8月に公開された修正版を利用した。オーラ衛星のOMIデータについてはver. 8.5のデータに地上観測との差異がみられたため（図A1-2）2005年1月から2007年11月分まではver. 8を用いた。2007年12月以降はver. 8.5のデータのみしか入手できないためver. 8.5を使用している。ただし、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、及びオゾンの長期変化に関連した解析の一部については、ノア衛星搭載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世界のオゾン全量データ及び太陽光後方散乱紫外線計（SBUV/2；Solar Backscatter UltraViolet）による世界のオゾン全量データを使用した。各データとその使用期間は表A1-2のとおり。なお、本文中の図のキャプションでは、TOMS及びOMIによるオゾン全量データを用いたことが明らかな場合は、衛星・装置名は記載せず単に「NASA提供のデータをもとに気象庁で作成」とした。

なお、解析データとしては利用していないが、OMI ver. 8.5のオゾン全量のバイアス補正を行うために、NASAが作成したSBUV(ver. 8.6) Merged Ozone Data Setsを利用した(NASA, 2012)。

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
国/機関	米国/NASA	旧・ソ連	米国/NASA	米国/NASA	米国/NOAA	米国/NOAA
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

NASA (National Aeronautics and Space Administration、米国航空宇宙局)

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration、米国海洋大気庁)

衛星によるオゾン全量観測データの地上観測との比較

衛星データの長期的な安定性をみるため、TOMS及び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地点における観測値との月平均値による比較結果を図A1-2に示す。これによれば、1979～1993年のニンバス7衛星のTOMSデータは、地上観測値に比べて約1%値が高い傾向である。1993年5月以降のメテオール3及びアースプローブ衛星のTOMSデータは、ばらつきが大きく、概ね地上観測値に比べて低い。一方、2005年以降、TOMSの後継としてOMIのデータを利用しているが、バージョン変更後のデータであるOMI ver. 8.5のデータは、ばらつきは少ないものの、-2～-1%程度の地上観測値との偏差がある。OMI ver. 8.5とver. 8のデータの存在する期間（2005年1月～2007年11月）で、帯状平均した緯度ごとのデータについて比較すると、両者のオゾン全量の差は、緯度や月によって大きさが一致する傾向がある（「オゾン層観測報告：2008」付録1-2図A1-5参照）。この期間のデータから月別・緯度別に両者間のバイアス補正値を算出した。しかし、OMI ver. 8.5のデータと北半球中緯度の地上観測との差の傾向が、2007年12月以後はそれ以前より差が小さくなっており、傾向が異なっている。このため、NASAが作成したSBUV(ver. 8.6) Merged Ozone Data Sets（以下、マージデータとする）の帯状平均値を用いてバイアス補正値の調整を行った。具体的には、2005年1月～2007年11月のマージデータとOMI ver. 8の差の平均と、

2007年12月～2011年のマージデータとOMI ver. 8.5 (バイアス補正済) の差の平均が同一となるように、2007年12月以降のOMI ver. 8.5 (バイアス補正済) データを緯度毎にさらに補正した。本報告では、緯度帯別の長期的な変化傾向を解析する際には、2007年12月以降のver. 8.5のデータにマージデータで調整したバイアス補正を適用した。また、1993年5月～1994年11月の衛星データ(メテオール3衛星によるオゾン全量)は、オゾン全量の地上観測値からの差のばらつきが大きいいため、長期変化傾向の計算から除外している。

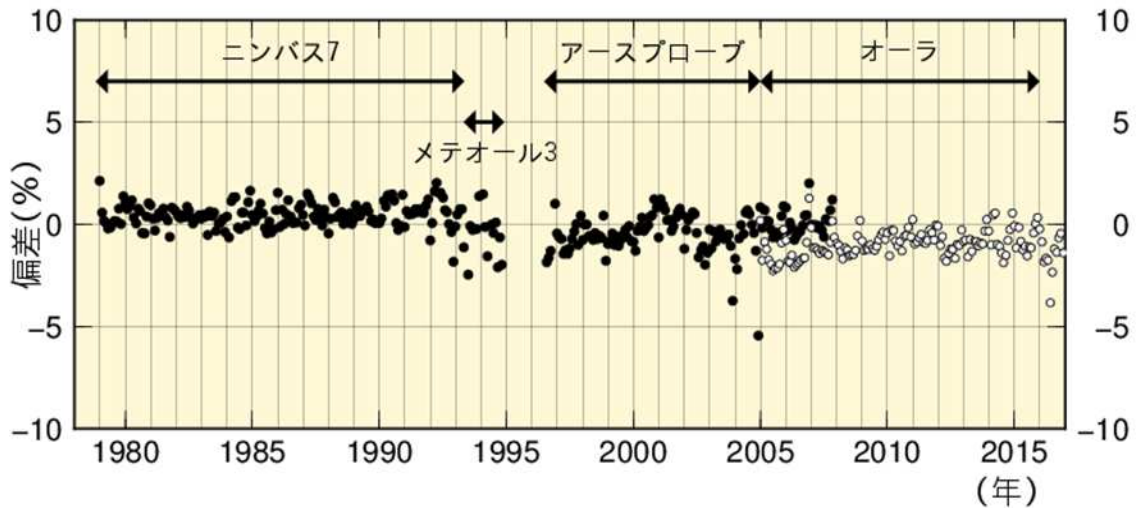


図 A1-2 : 衛星観測データと地上観測データの比較

北半球中緯度帯(北緯 30 - 60 度)の TOMS 及び OMI による観測値(月平均値)と地上観測値との偏差(%)の推移。地上の観測地点に対応する衛星観測データを求め比較した。オーラ衛星期間の は OMI ver. 8、 は OMI ver. 8.5 のデータ。各月の比較地点数は 20 ~ 50 地点。

付録2 長期変化傾向の算出における既知の自然変動成分の除去について

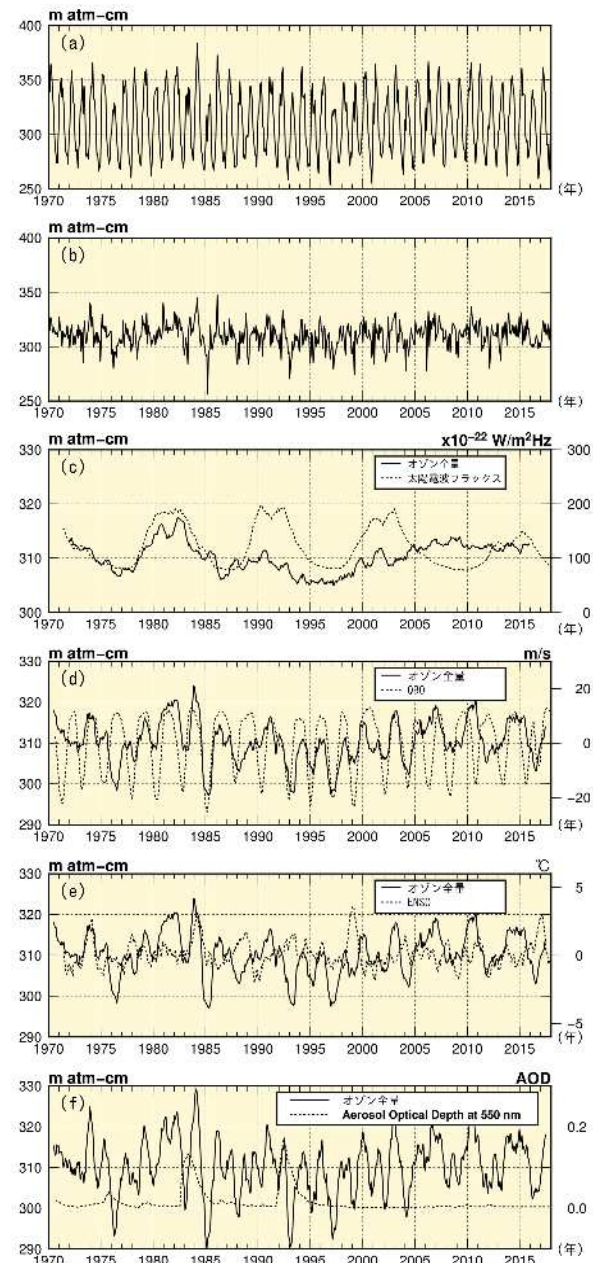
オゾン全量はさまざまな要因によって変動する。一例として、図A2-1(a)につくばにおける1970年から2017年までのオゾン全量月平均値の推移を示す。月平均値の推移には明瞭な季節変動がみられ、年平均値の20~30%程度の振幅をもっている。この時系列から季節変動成分を取り除いたオゾン全量の変化を図A2-1(b)に示す。この経年変化には、2~3年や10年程度のほぼ周期的な変動成分が含まれており、オゾンの長期変化傾向(トレンド)を正確に求めるには、季節変動に加え、これらの変動成分をオゾンの時系列データから除去する必要がある(吉松ほか, 2005)。

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(図A2-1(c))、約2年周期のQBO(図A2-1(d))、ENSO(エルニーニョ/南方振動)(図A2-1(e))、大きな火山噴火等で生じる成層圏エアロゾル(図A2-1(f))がある。ENSOの指標としては、気象庁のエルニーニョ監視指数(エルニーニョ監視海域(NINO.3)の基準値との差)を用いた。大きな火山噴火等で生じる成層圏エアロゾル量の指標としては、NASAのゴダード宇宙飛行センターで求められたStratospheric Aerosol Optical Thickness データを用いた。

図A2-2には季節変動、太陽活動の影響及びQBO、ENSO、成層圏エアロゾルの影響を取り除いたオゾン全量の時系列を示す。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ともなう変動成分と、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。

実際のオゾン量の観測データから、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。

- 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、全期間の累年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(図A2-1(b))。
- 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、QBOの7か月移動平均値、エルニー

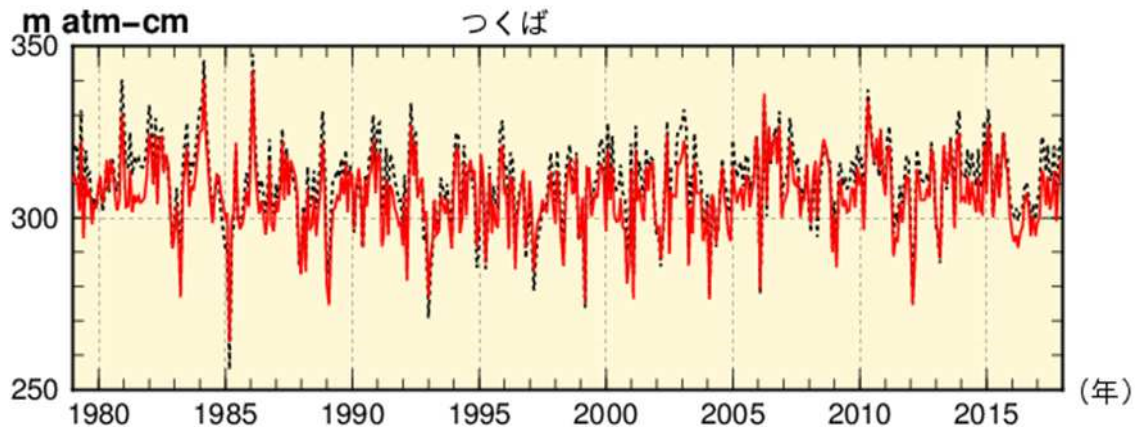


図A2-1: つくばにおけるオゾン全量の変化と各自然変動要因との関係

(a)月平均値、(b)季節変動除去値の時系列、(c)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:時間ラグを設定)、(d)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)、(e)季節変動除去値の13か月移動平均値(太線)とエルニーニョ監視指数(破線:時間ラグを設定)。(f)季節変動除去値の7か月移動平均値(太線)とAerosol Optical Thickness(550 nm)(破線:時間ラグを設定)

ニヨ監視指数、Stratospheric Aerosol Optical Thicknessデータ及びトレンド成分を説明変数とした重回帰式を求める（それぞれの要素毎に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（図A2-1(c)、(d)、(e)、(f)）。トレンド成分の説明変数は、衛星観測によるオゾン全量帯状平均値に対しては中緯度用のEESCを用い、その他では折れ線フィッティング⁹を用いた。

- 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、QBO、ENSO及び火山性エアロゾル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（図A2-2）。



図A2-2：つくばにおけるオゾン全量の変化

季節変動除去値（破線）と季節変動と既知の自然変動（太陽活動、QBO、ENSO、火山性エアロゾル）の影響成分を除去した値（赤線）

⁹ オゾン量の長期トレンドの研究で用いられる手法。減少期と増加期の2本の直線を転換点で繋げた回帰式によりトレンドを算出する。詳細は「オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）」を参照。

付録3 オゾン量の長期変化傾向の評価方法について

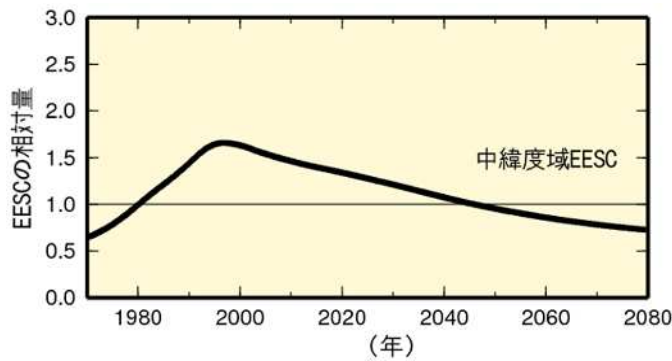
オゾン減少期と近年の長期変化傾向の評価

オゾン量の長期的な変化傾向を抽出するため、「オゾン層・紫外線の年のまとめ（2013年）」まではEESC（Newman *et al.*, 2007：等価実効成層圏塩素。巻末「用語解説」参照）の時系列（図A3-1）と関連づけた解析を採用していたが、このような解析は、オゾン量の長期変化傾向がEESCの変化曲線で規定され、他の変動要因の影響を排除してしまう欠点がある（WMO 2014）。

本報告では、「オゾン層破壊の科学アセスメント2014」で用いられている手法に準じて、付録2で示した既知の周期的な自然変動を除去したオゾン時系列データを用いて、1979年1月から1996年12月の回帰直線によりオゾン量が減少した時期の変化傾向を求め、2000年1月から最新年までの回帰直線で近年の変化傾向を求めた（図A3-2）。

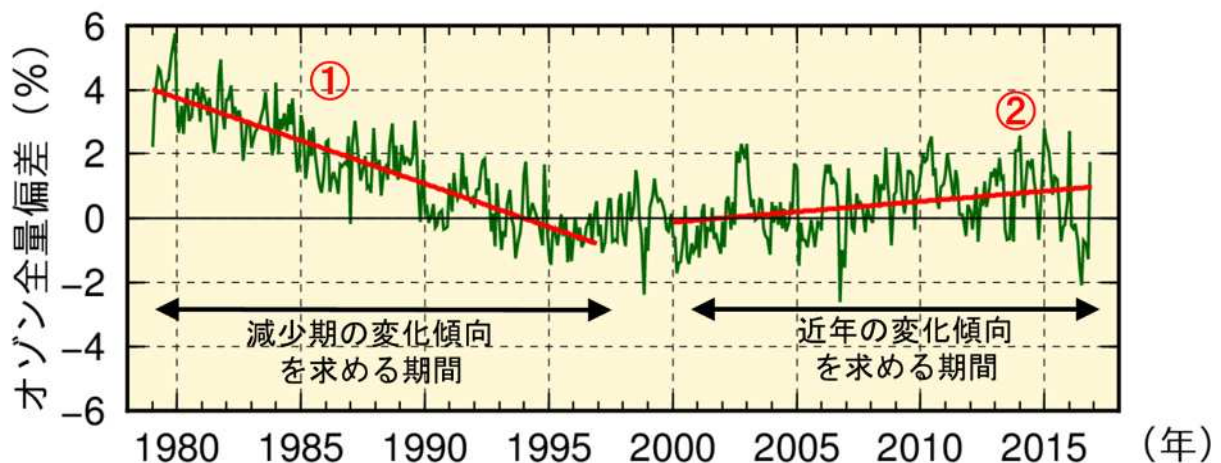
観測データの選別について

長期変化傾向の抽出で使用する地上観測地点は、毎月の月平均値を衛星による観測データとの全期間を通して比較して大きな差がない地点を選択した。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。衛星観測データの扱いについては付録1-3を参照。



図A3-1：等価実効成層圏塩素（EESC）の経年変化

1980年を1とした相対的な値として示した。WMO（2014）と同様に、対流圏から成層圏に入ったオゾン層破壊物質が中緯度域まで塩素・臭素原子として到達するまでの時間を3年として算出。また、臭素原子のオゾン破壊効率を塩素原子の60倍とした。EESCの数値はNASAから提供。



図A3-2：オゾンの長期変化傾向の解析

長期変化傾向の解析を、世界のオゾン全量に適用した例。緑実線は世界の地上観測によるオゾン全量偏差（％）で、既知の自然変動成分を除去している（付録2参照）。比較の基準値は1994～2008年の累年平均値。赤実線は地上観測データの1979～1996年の回帰直線（ ）と2000～2016年の回帰直線（ ）。

世界の地上観測点にはWOUDCのデータ（図2-1で用いた65地点の地上観測データ）を用いた。