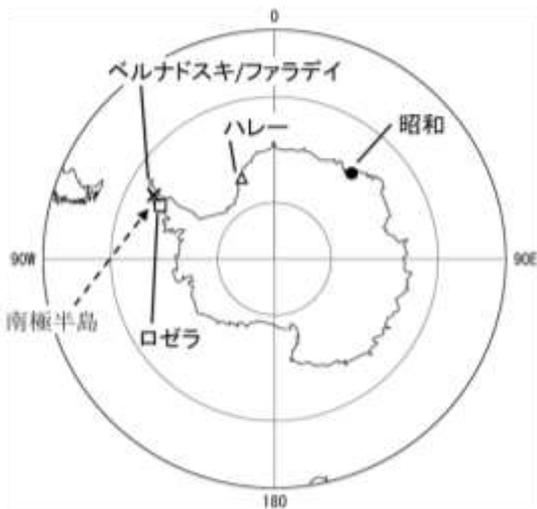
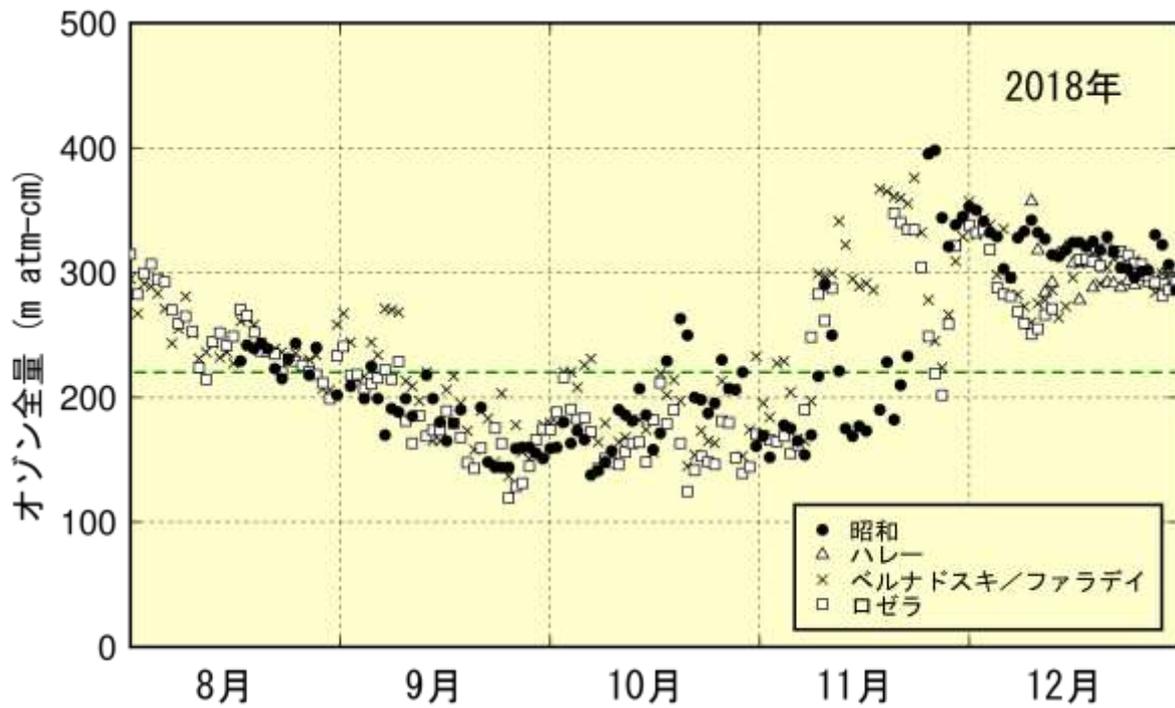


資料

資料 南極各国基地におけるオゾン全量 (2018年)



図S-1 : 南極各国基地におけるオゾン全量 (2018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2018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である220 m atm-cmを緑破線で示した。なお、ハレーは12月のみ。

付録

付録1 解析に使用した資料

付録1-1 地上観測データ（オゾン）¹⁰

この報告で使用した地上からの観測データは、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 2017 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。2013～2017 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。

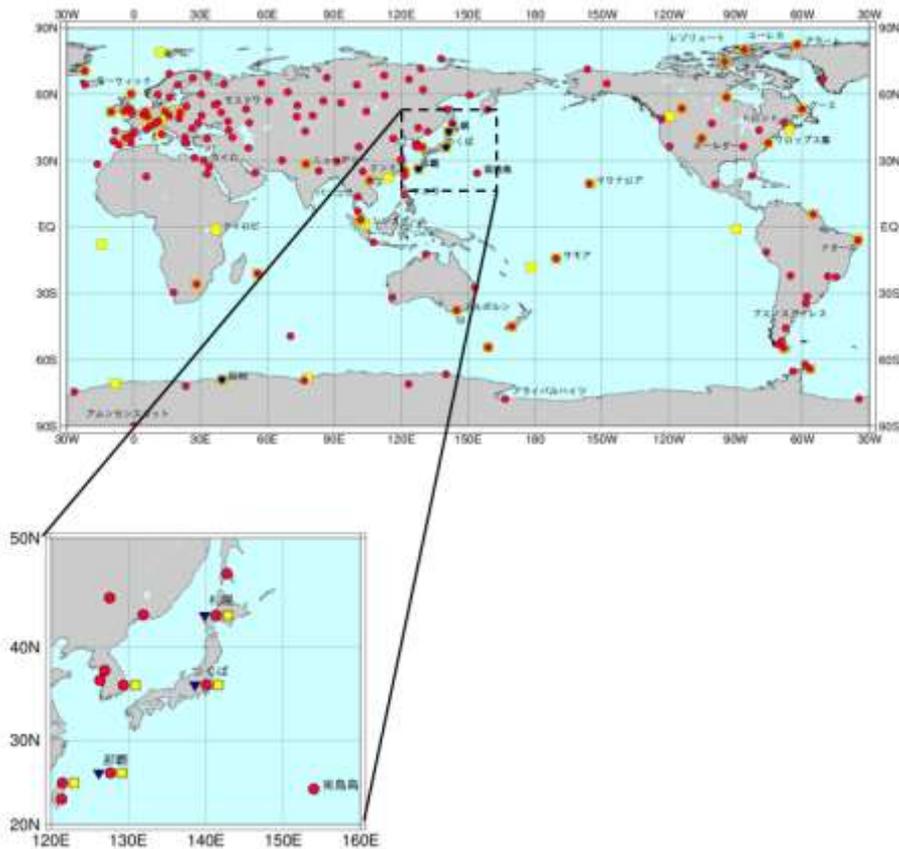


図 A1-1：オゾン観測地点の分布（2013～2017 年）

【上図】全量観測は 161 地点（●印）、反転観測は 4 地点（▼印）、オゾンゾンデ観測は 54 地点（■印）。

【下図】日本周辺域の拡大図。

気象庁のオゾン全量観測データ及び反転観測データ：

気象庁の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、1994 年南鳥島である。なお、鹿児島での観測は 2005 年 3 月、南鳥島での観測は 2018 年 1 月をもって終了した。

オゾン全量観測及び反転観測の測器は、南鳥島を除いた地点では、観測開始からドブソン分光光度計を使用していたが、札幌、つくば、那覇においては 2018 年 2 月からブリューワー分光光度計

¹⁰ 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。
https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-15ozone_observe.html

を使用している。また、南極昭和基地では観測開始から現在までドブソン分光光度計を使用しており、南鳥島においては、観測開始から終了までブリューワー分光光度計を使用した。

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) したものを利用している。また、札幌、つくば、那覇のオゾン全量及び反転観測データについては、観測測器の変更に伴う測器間バイアスの補正を行っている。

気象庁の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。

【オゾンゾンデ過去データの再計算手法について】

気象庁では、1965年頃に気象研究所で開発されたKC型オゾンゾンデ（1968年からはKC68型、1979年からはKC79型、1997年からはKC96型又はKC02G型を使用）を長年使用してきたが、2008年から2010年にかけて世界で広く使用されているECC型に移行した。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型はともにドイツ・ユーリッヒのオゾンゾンデ世界校正センター（WCCOS : World Calibration Center for Ozone Sondes）の基準器（UVフォトメータ）と比較されており、KC型とECC型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の比較実験でも、同様な差があることがわかっている。

本報告書の2018年版より、ともにWCCOSの基準器との比較実験の結果からオゾン反応の変換効率を決定し、それぞれの観測データに適用することで、オゾンゾンデ観測データの均質性を向上させることとした。

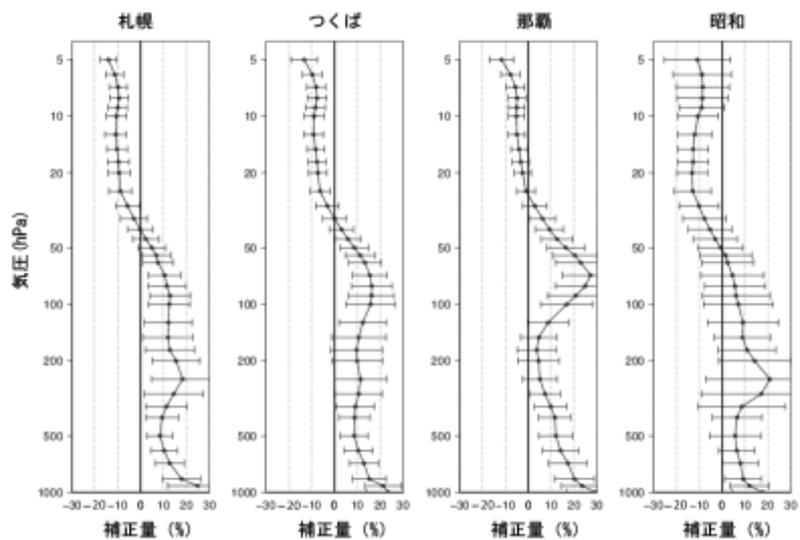
KC型については、その特性実験により判明している、反応の速さ（応答性）、オゾンを吸入していないときに流れる微弱な電流（暗電流）、観測高度に対応した空気の吸入量（ポンプ効率）を補正したうえで、KC96型が参加したJOSIE2000の比較結果を用いてオゾン反応の変換効率を決定し、KC96型とKC02G型に適用した。それ以前に使用していたKC79型及びKC68型の変換効率は、KC79型とKC96型との連結比較観測の結果を用いて整合をとった。また、ドブソン比による補正（規格化）において余剰オゾン量を推定する手法を、等混合比法から衛星観測による気候値を用いた算出法（McPeters and Labow, 2012）に変更した。

ECC型については、オゾン鉛直分布データの全球的な整合性確保に向けた活動（オゾンゾンデデータ品質評価活動：O3S-DQA）で示された再処理ガイドライン（O3S-DQA, 2012）による再計算を実施している。

図A1-2は、KC型とECC型それぞれの再計算による高度別の補正量（%）の使用期間での平均値である。KC型は、下部成層圏より低い高度で正の補正量となり、上部成層圏では負の補正量となった。また、ECC型は成層圏の50hPaより高い高度で負の補正量となった。

図A1-3は、オゾンゾンデデータの補正前後の値の時系列である。2007年まではKC型を使用していたため、下部成層圏より低い高度では補正後のほうが高く、上部成層圏では補正後のほうが低くなっている時期が多い。2008年以降はECC型となり、成層圏の50hPaより高い高度では補正後のほうが低くなっている時期が多い。

(a) KC型の補正值



(b) ECC型の補正值

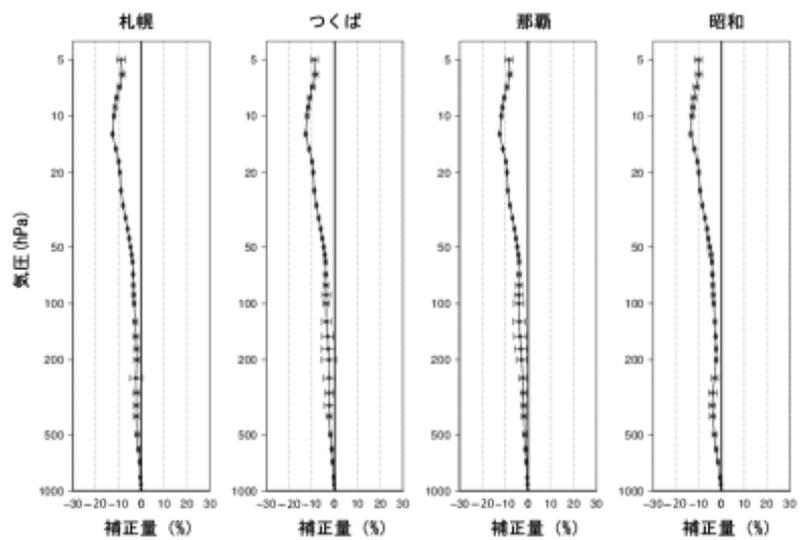


図 A1-2 : KC 型オゾンゾンデと ECC 型オゾンゾンデの再計算による補正量の平均値

札幌、つくば、那覇、昭和基地、における(a)KC型及び(b)ECC型の再計算による補正量の使用した期間での平均値(%)。左右のエラーバーは標準偏差を示している。

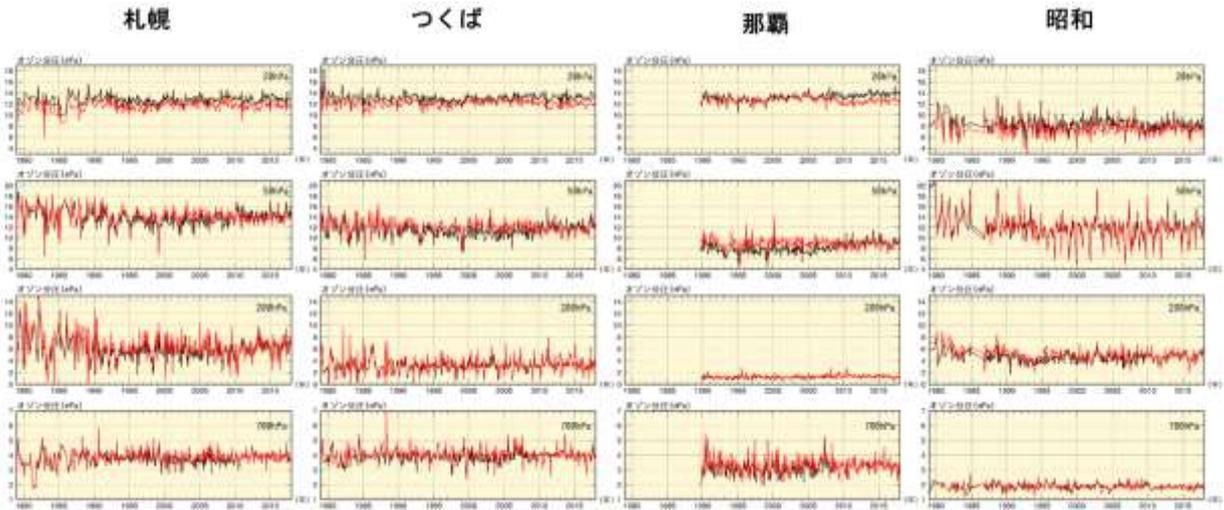


図 A1-3 : オゾンゾンデデータの補正前後の値の差の時系列図

札幌、つくば、那覇、昭和基地におけるオゾンゾンデ観測データの補正前後の時系列図。各気圧面（上から 20hPa、50hPa、200hPa、700hPa）について、赤線が補正後、黒線が補正前。それぞれ月平均値を使用し、季節変動成分を除いた 1979 年から 2017 年まで図示している。

【反転観測の特徴について】

反転観測データは、上空のオゾン量を下表に示す層に分けて算出したもので、そのデータは上部成層圏のオゾン量の監視に有効である。図A1-4に、反転観測による層別オゾン量と比較のためオゾンゾンデによる層別オゾン量を、それぞれ参照値（1994～2008年の月別累年平均値）からの偏差として時系列で示す。オゾンゾンデについては、高度別オゾン分圧から、各層のオゾン量を算出している。また、反転観測は第4層（高度約18km）以上のみを図示する。

札幌の第7層やつくばの第7層と第8層では、1980年から1990年代半ば又は後半にかけて、オゾンの減少傾向があらわれており、オゾン層破壊が上部成層圏で顕著に起こったことに対応している。札幌とつくばの第7層と第8層では、1980年代半ば頃と1990年代初め頃にオゾン量が少なくなっており、これは火山噴火（エルチチョン火山噴火：1982年、ピナトゥボ火山噴火：1991年）による影響が考えられる。また、札幌とつくばの第7層と第8層では2000年以降、緩やかな増加傾向がみられており、「オゾン層破壊の科学アセスメント：2018」（WMO, 2018）で評価された、上部成層圏ではオゾン層は回復を始めているという内容と整合している。

表 A1-1 : 反転観測における各層の上端と下端の気圧

| 層番号 | 第 1 層 | 第 2 層 | 第 3 層 | 第 4 層 | 第 5 層 | 第 6 層 | 第 7 層 | 第 8 層 | 第 9 層 | 第 10 層 |
|--------------------------|------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 各層の上端と 下端の気圧 (hPa) | 地表 ～ 253.3 | 253.3 ～ 126.7 | 126.7 ～ 63.3 | 63.3 ～ 31.7 | 31.7 ～ 15.8 | 15.8 ～ 7.92 | 7.92 ～ 3.96 | 3.96 ～ 1.98 | 1.98 ～ 0.99 | 0.99 ～ 大気 上端 |

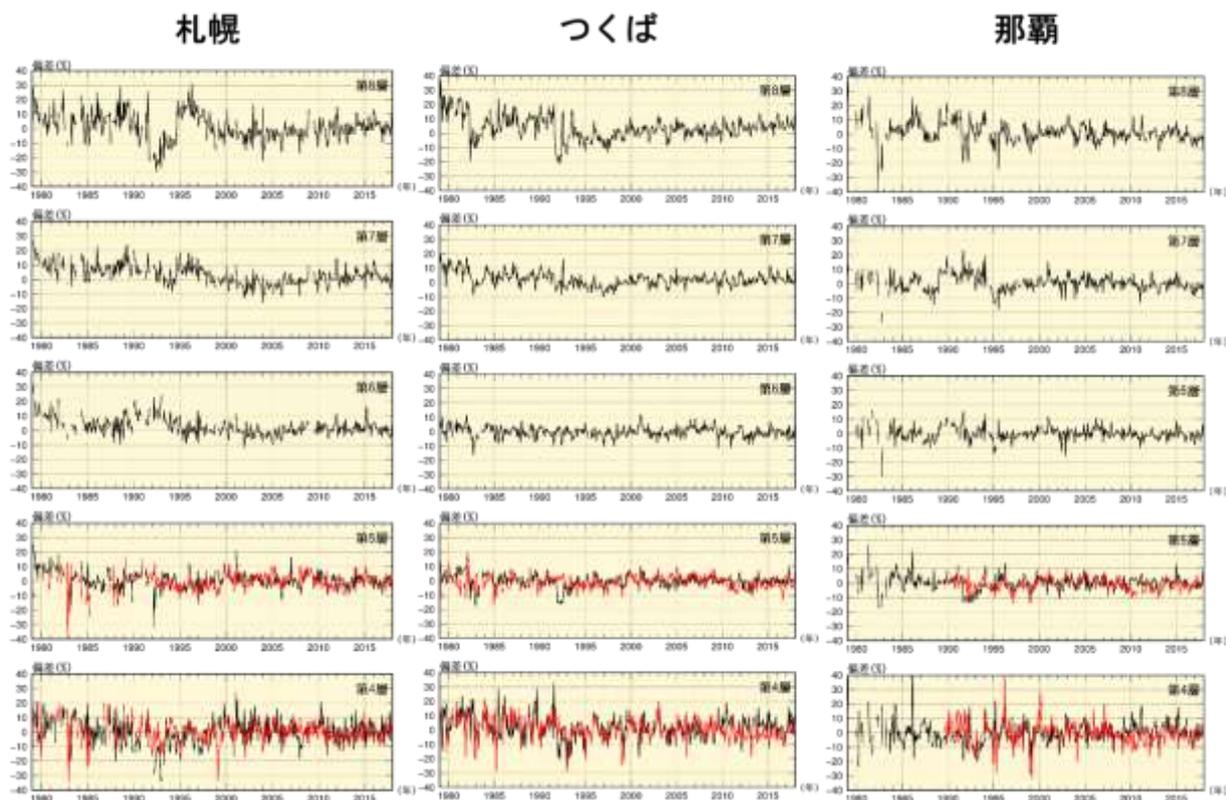


図 A1-4 : オゾンゾンデ観測データと地上観測データの時系列図

赤線がオゾンゾンデ観測データ、黒線が反転観測データ。それぞれ月平均値を使用し、参照値（1994～2008年の月別累年平均値）からの偏差を1979年から2017年まで図示している。

付録1-2 地上観測データ（紫外線）¹¹

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）。紫外線は、上空のオゾン量と密接な関連があり、オゾン層の破壊が進む中で生物に有害なB領域紫外線（UV-B）の地表到達量の状況を把握するために観測を開始したものである。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に290 nm から 325 nm までである。また、南極昭和基地では、気象庁は1991年2月から国立極地研究所と共同で、研究観測を開始し、1994年2月からは気象庁単独で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。

気象庁における波長別の紫外線観測は世界でも先駆的に行われ、基準ランプ（米国の標準技術研究所で維持する基準照度が付けられた1000Wランプ）による波長別紫外域日射照度の較正体系を構築し、また、1994年からは、同様に較正体系を構築しているカナダ環境・気候変動省との国際相互比較を概ね4年毎に実施している。しかし、観測開始当初は、較正時の検定誤差が大きく、較正前後の観測値に段差が確認された。そのため、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。

¹¹ 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。
https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/3-45uvb_observe.html

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

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、Nimbus7、Meteor3、Earth Probe 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、Aura 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。Nimbus7 と Meteor3 両衛星のデータについては、Earth Probe 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、Earth Probe 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。Aura 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 A1-5）、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、Meteor3 衛星以降 Earth Probe 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、NOAA 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 | Nimbus7 | Meteor3 | Earth Probe | Aura | NOAA | NOAA |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|---------|
| 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～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 A1-5 に示す。

これによれば、1979～1993年のNimbus7衛星のTOMSデータは、地上観測値に比べて約1%高い傾向である。1993年5月以降のMeteor3及びEarth Probe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、帯状平均した緯度毎のデータについて比較すると、両者のオゾン全量の差は、緯度別、月別に分類すると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月以降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 (Meteor3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ため、長期変化傾向の計算から除外している。

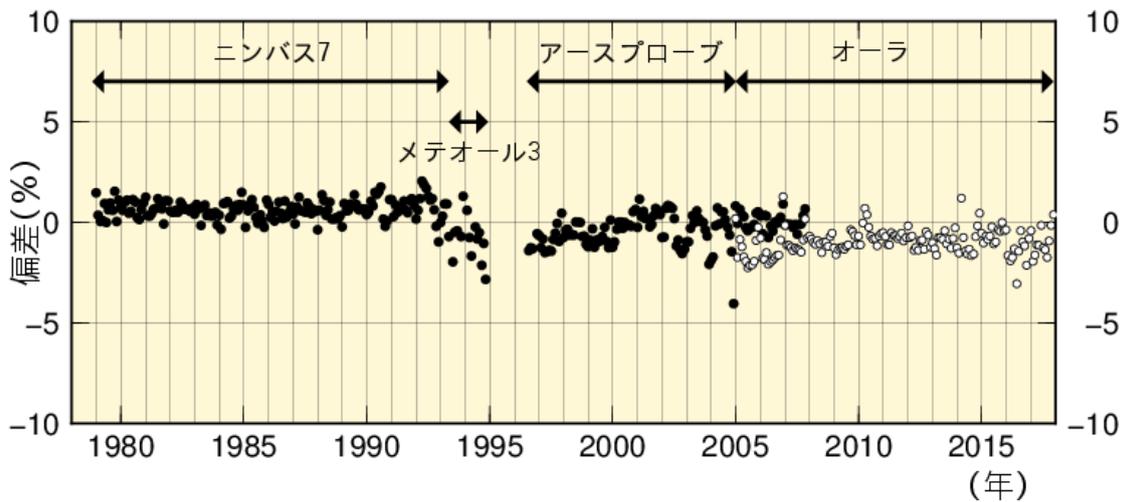


図 A1-5 : 衛星観測データと地上観測データの比較

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。Aura 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約 20~60 地点。

付録 1-4 紫外線解析値

紫外線解析値は UV インデックスの実況値で、全国を約 20km 四方に区分した領域毎に、数値計算による上空のオゾン量やアメダスの日照時間等のデータを用いて算出される。紫外線解析値の平均誤差を、札幌、つくば、那覇の紫外線観測値 (札幌、那覇は 2018 年 1 月をもって観測を終了) と比較して求めたところ、3 地点ともに約±0.1 であった (図 A1-6)。

本報告書では、1 日の中で最大となった UV インデックスを日最大 UV インデックスとし、その月平均値を用いて全国の紫外線の状況を評価している。

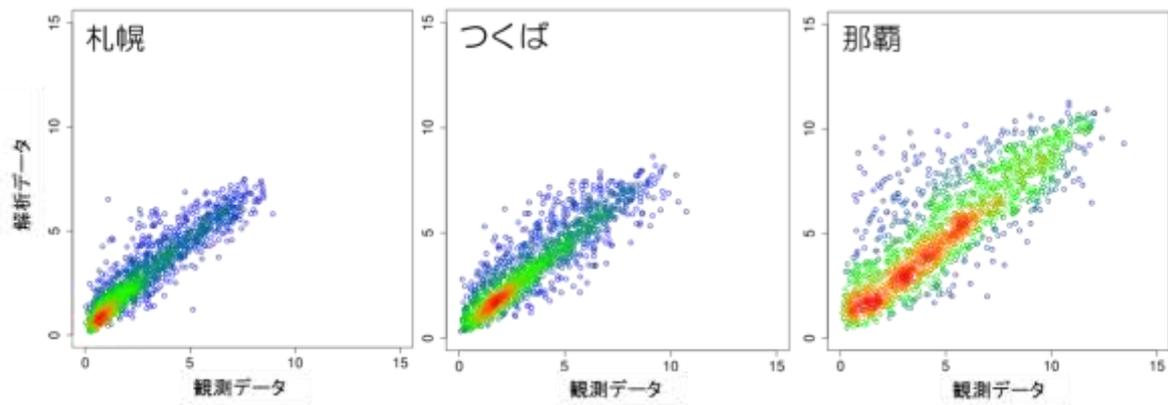


図 A1-6 : 国内 3 地点における紫外線観測値と紫外線解析値の比較グラフ

国内 3 地点（札幌、つくば、那覇）における 2016 年の 10～14 時（紫外線が強い時間帯）の毎正時データを使用。暖色ほどプロットの出現頻度が高い。

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

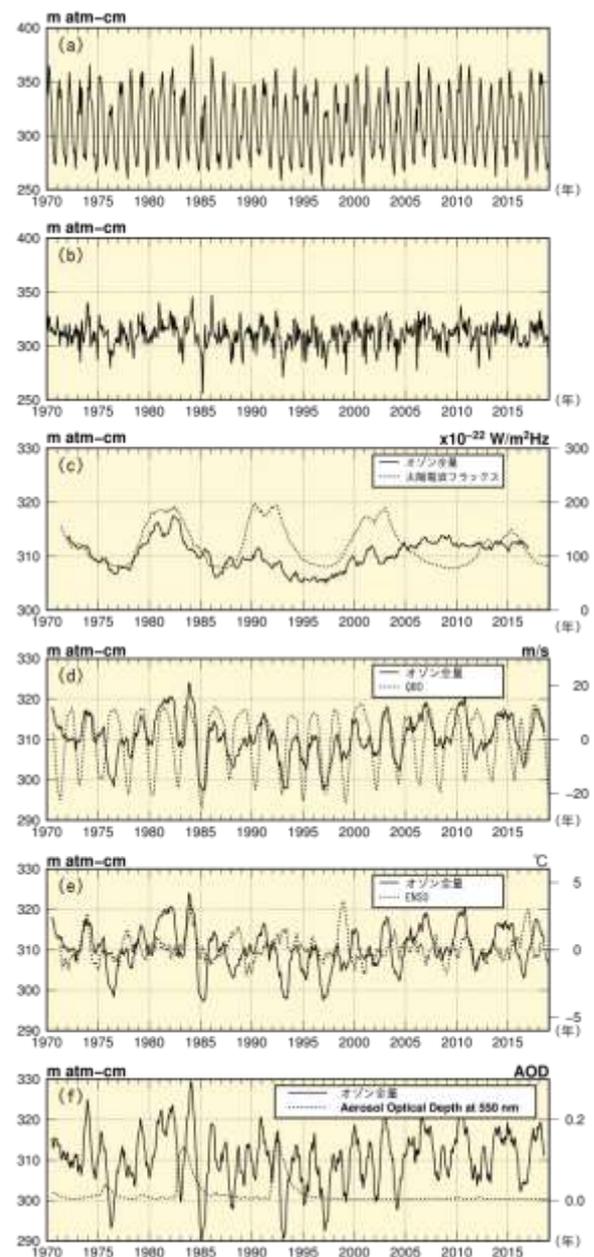
オゾン全量はさまざまな要因によって変動する。一例として、図A2-1(a)につくばにおける1970年から2018年までのオゾン全量月平均値の推移を示す。月平均値の推移には明瞭な季節変動がみられ、年平均値の20～30%程度の振幅をもっている。この時系列から季節変動成分を取り除いたオゾン全量の変化を図A2-1(b)に示す。この経年変化には、2～3年や10年程度のほぼ周期的な変動成分が含まれており、オゾンの長期変化傾向（トレンド）を正確に求めるには、季節変動に加え、これらの変動成分をオゾンの時系列データから除去する必要がある（吉松ほか, 2005）。

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

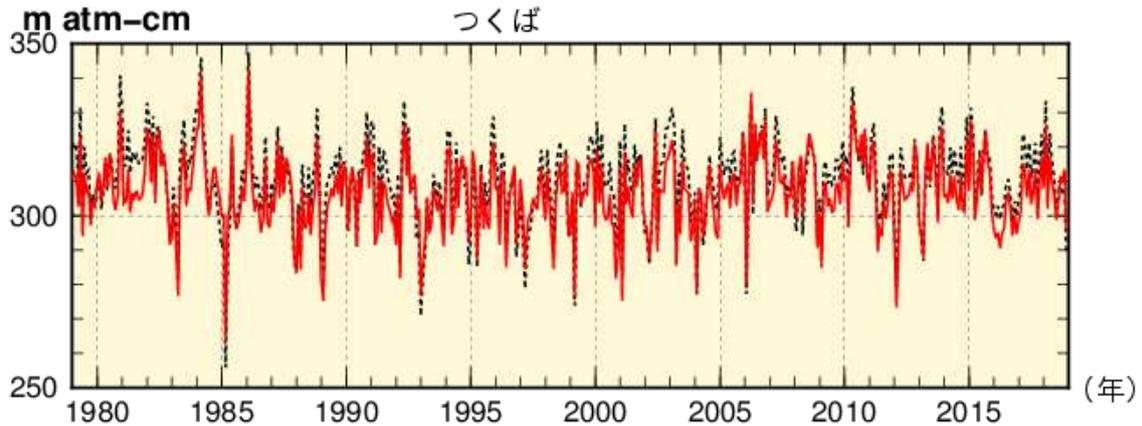


図A2-1：つくばにおけるオゾン全量の変化と各自然変動要因との関係

(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Stratospheric 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毎にオゾン全量との相関が最も高くなるように時間ラグ¹²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（Newman *et al.*, 2007：等価実効成層圏塩素。巻末「用語解説」参照）を用い、その他では折れ線フィッティング¹³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）

¹² 図 A2-1 の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時間ラグは QBO が 4 か月、太陽活動、ENSO、火山性エアロゾルが 12 か月。

¹³ オゾン量の長期トレンドの解析に用いられる手法の一つ。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

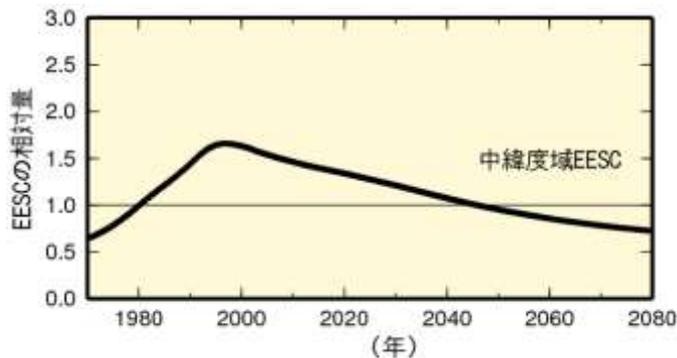
オゾン減少期と近年の長期変化傾向の評価

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2018」(WMO, 2018) 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2018年12月までの回帰直線で近年の変化傾向を求めた (図A3-2)。

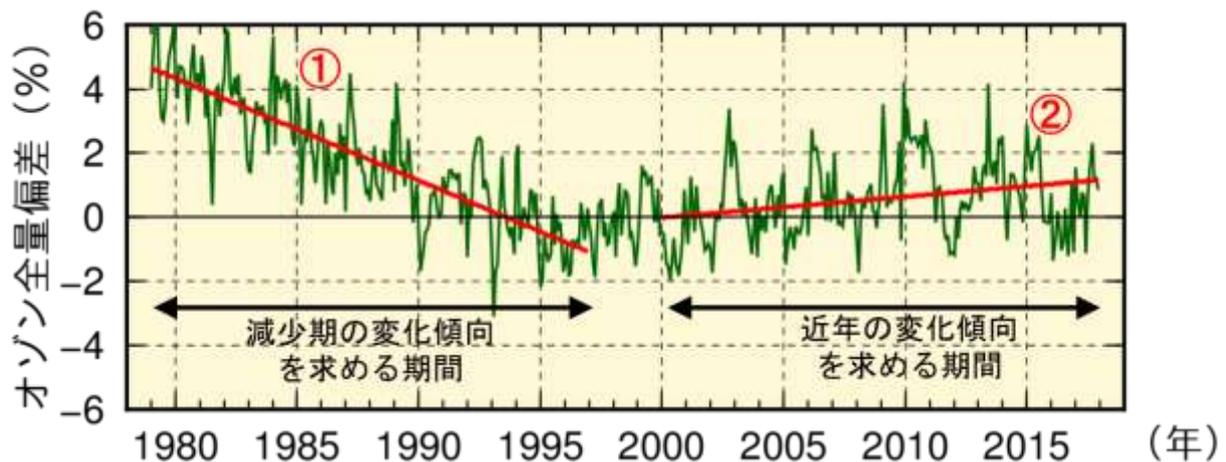
観測データの選別について

本報告書で使用した地上のオゾン全量観測データは、参照値期間 (1994~2008年) において、1年に6か月以上の月平均値が10年以上 (参照値期間の3分の2以上) ある地点 (121地点) のデータを使用した。



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、臭素原子のオゾン破壊効率を塩素原子の60倍として算出した。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 (①) と 2000~2017 年の回帰直線 (②)。世界の地上観測点には WUODC のデータ (図 2-1 で用いた 114 地点の地上観測データ) を用いた。