3. オゾン層の監視結果

3-1. 地球規模のオゾン層の状況

(a) オゾン量のトレンド解析

既知の自然要因による変動の除去

オゾン量のトレンド(長期変化傾向)をより正確に評価するためには、既知の様々な自然 要因によるオゾン変動を取り除くことが必要である。そのためオゾン量の観測値から、季節 変動、太陽黒点活動の変動(約11年ごと)、準2年周期振動(QBO)及び大規模火山噴煙 による影響(成層圏エアロゾル)、ENSO(エルニーニョ/ラニーニャ現象)を差し引いた時 系列を計算する。こうして得られるオゾン量の長期的な変動は、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関連 づけて理解されている。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。 オゾン量の長期的な変化はその特徴から、1970年代及びそれ以前のオゾン量がほぼ一定し ていた状態、1979~1990年代前半までのほぼ直線的な減少傾向、1990年代後半の減少傾 向の緩和、及び 2000年代からの緩やかな増加傾向に分類できる。

トレンドの評価方法及びその留意点

オゾン量の長期的な変化傾向を抽出するため、これまで 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 1-3-1)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)。

本報告書では、「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、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 1-3-2)。





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の数値は米国航空 宇宙局(NASA)から提供。 (出典)気象庁 オゾン層・紫外線の年のまと

(出典)気象庁 オソン増・紫外線の牛のまと め(2014年)より

^{*} EESC(等価実効成層圏塩素)とは、塩素及び臭素によるオゾン破壊効率が異なることを考慮して臭素 濃度を塩素濃度に換算して求めた成層圏での塩素・臭素濃度のことをいう。



長期変化傾向の解析を、世界のオゾン全量に適用した例。 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。比 較の基準値は 1994~2008 年の平均値。直線は地上観測データの 1979~1996 年の回帰直線(①) と 2000~2014年の回帰直線(②)。世界の地上観測点は世界オゾン・紫外線資料センター(WOUDC) のデータを用いた。(出典)気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2014年)より

なお、本報告書において、月別平均値から季節変動および既知の自然変動による影響を除 去した時系列データの回帰直線から長期変化傾向を算出した図表は下記のとおり。

図1-3-10下段 【P25、26: 南極昭和基地上空のオゾン分圧のトレンドの高度分布】 図1-3-18 【P35:日本上空のオゾン全量の長期変化傾向】

【P36:日本上空のオゾンの高度別トレンド】 図1-3-19下段

本報告書では2000年以降のオゾン量の変化を「近年の変化傾向」として評価した。

第1部3-1(b)オゾン全量のトレンド及び(c)オゾン全量のトレンドの分布及び季節変 動(P16~19)で使用する地上観測地点の選択にあたっては、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した比較において、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。衛星観測データの扱いに ついては第1部参考資料12(P73~74)を参照。

(b) オゾン全量のトレンド

1970~2014 年までの地上及び衛星からの観測による月別オゾン全量の偏差(%)(1994~2008 年の平均値を基準とする)の経年変化を図 1-3-3 に示す。なお、1994~2008 年は、 世界平均のオゾン量の減少傾向が止まり、オゾン量がほぼ一定となっており、最もオゾン全 量が少なかった時期の平均値として比較の対象に用いた。

オゾン全量は 1980 年代から 1990 年代前半にかけて地球規模(北緯 70 度~南緯 70 度) で大きく減少しており、過去5年間(2010~2014年)の平均値は、1994~2008年の平均 値より 0.5~0.9%高いが、1970~1980年の平均値(この時期にはオゾン層破壊現象がまだ 現れていないと見なしうる)と比べると低緯度を除き 3~4%低い。近年のオゾン層の状況 は、人為的なオゾン層破壊によりオゾン量が少なかった時期(1980年代から 1990年代前 半)と同程度か僅かに増加しているが、依然として 1980年以前のレベルより明らかに低い 状態が続いていることを示している。

この 1990 年代前半までの減少傾向は、周期性のある既知の自然変動要因のみからは説明 できず、CFC 等の大気中濃度の増加が主要因であると考えられる。特に 1980 年代以降の 南極域上空のオゾンホールの発達は、大気中の CFC 等の濃度増加によると考えることが最 も妥当である。一方、1990 年代後半以降ではオゾン全量にほとんど変化が無いかわずかな 増加が認められることについては、オゾン層破壊物質の緩やかな減少に関係していると思 われるが、大気循環の変化も影響しているとする研究も報告されている (WMO, 2011、 Hadjinicolaou et al., 2005)。

北半球では、1993年頃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)の影響*や北極域成層圏で低温となった冬が数回あったことにともない、オゾン破壊が 促進されたためと考えられている。

^{*} ピナトゥボ火山噴火(1991年6月)にともない、成層圏のエアロゾル粒子が増加し、その粒子表面での不均一反応によってオゾン破壊が促進された(WMO, 2011)。



図 1-3-3 世界のオゾン全量偏差(%)の経年変化

実線は世界の地上観測によるオゾン全量偏差(%)。●印は衛星観測データで、季節変動成分は除去してい る。比較の基準は1994~2008年世界平均のオゾン量の減少傾向が止まり、オゾン量がほぼ一定となってお り、最もオゾン全量が少なかった時期)の平均値。太直線は地上観測データの1970~1980年(この時期に はオゾン層破壊現象がまだ現れていないと見なしうる)の平均値と過去5年(2010~2014年)の平均値。 上段から世界全体(衛星観測データは北緯70度~南緯70度の平均)、北半球中緯度(北緯30度~60度平均)、 低緯度(北緯30度~南緯30度平均)、南半球全体(衛星データは0度~南緯70度平均)のオゾン全量の変化 の割合を示す。世界の地上観測点数は65地点。北半球中緯度は40地点、低緯度は12地点、南半球は10地点。 (出典)気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2014年)より

(c) オゾン全量トレンドの分布及び季節変動

オゾン全量トレンドの地球規模の分布

観測されたデータによる緯度帯別オゾン全量の1979年~1996年(左図)および2000年~ 2014年(右図)の変化傾向(%)を図1-3-4に示す。

1979年~1996年の(左図)衛星観測(●印)では低緯度帯の一部(北緯20度~南緯10度) を除き統計的に有意な減少がみられ、地上観測も概ね同様の傾向を示している。特に南半球 高緯度で減少傾向が大きいが、これは南極オゾンホールの出現に対応している。

2000~2014年の変化傾向では、北半球においては北緯10~70度で有意な増加傾向がみら れたが、中緯度(北緯40~60度)の地上観測データに着目すると変化傾向にばらつきがみ られ、また一部の観測地点では減少傾向となっていた。

南半球では、南緯40度以南で有意な増加傾向がみられ、特に南緯60度~70度で増加傾向 が大きく、オゾンホールの衰退を反映している可能性がある。

なお、2000年以降の世界全体のオゾン全量の増加傾向については、大気中のオゾン層破 壊物質の減少と自然変動が影響していると考えられている。しかし、自然変動と比べてオゾ ン層破壊物質が及ぼすオゾン全量変化が小さいため、オゾン層破壊物質がオゾン全量に及 ぼす影響を正確に見積もることは現状では難しい(WMO, 2014)。





オゾン全量の長期変化傾向を示す。左図は、1979~1996年の変化傾向(%/10年)、右図は2000~2014年 の変化傾向(%/10年)を示す。緯度帯(10度)毎の衛星観測データ(●印)をプロットしている。衛星観 測データの縦線は95%信頼区間の範囲。世界の観測地点(56地点。2010年以降の観測データのない地点は 除いた)のオゾン全量データ及びNASA提供の衛星観測データから作成。

(出典)気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2014年)より

オゾン全量トレンドの季節変動(衛星データ)

オゾン全量のトレンドの季節変動をみるため、緯度別・月別オゾン全量の1979年~1996 年(上図)と2000年~2014年(下図)の変化傾向(%/10年)を図1-3-5に示す。

1979~1996年では、年間を通して低緯度帯を除き、南北両半球のほとんどの領域で有意 な減少傾向がみられた。北半球の高緯度では3~4月に、南半球の中・高緯度では8~10月に オゾン全量の減少の割合が大きく、極域での冬季から春季にかけてのオゾン層破壊の影響 が比較的大きかったことを示している。これは冬季の低温条件下で塩素や臭素がオゾンを 破壊しやすい物質となって蓄積され、太陽光の照射を受ける春季に特にオゾン層破壊を進 行させるためと考えられる(詳細は第1部参考資料1(P53-54)を参照)。

2000年以降ではほとんどの領域で増加傾向が見られるが、有意なものは北緯30度付近の 11~12月と南半球高緯度の1~4月等である。8~10月に南半球高緯度で顕著な増加がみら れるが、有意なところは8月の一部のみで、ほとんどの時期では有意性がみられない。これ らの領域では、オゾンホールの現れる場所が移り変わることによる年変動が大きいことが 影響していると思われる。



図 1-3-5 緯度別・月別オゾン全量の変化傾向(%/10年)

(上図) 1979~1996年と(下図) 2000~2014年のオゾン全量の変化傾向(%/10年)の月別分布。衛星観 測による帯状平均オゾン全量データを用いて求めたもの。等値線間隔は2%。薄い陰影部は95%信頼区間で 有意に増加または減少している領域。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。

(出典)気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2014年)より

(d) オゾンの高度別分布のトレンド

オゾンの高度分布のトレンド(地球規模)

オゾンの鉛直分布のトレンドをみるため、1980年代のオゾン量の変化傾向(%/10年)を 緯度高度別に示したものを図1-3-6に示す。北半球では、中緯度から高緯度にかけての、40km 付近と20km付近以下の2つの高度に減少率の大きい領域がみられる。南半球でも、中緯度 から高緯度にかけての40km付近は減少率が大きい領域が見られる。

高度40km付近と高度20km付近のオゾン減少は、ともにCFC等から解離した塩素による ものであるが、高度40km付近の減少は、気相反応のみによって働く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相反応によって活 性化される別の触媒反応サイクルによると考えられている(詳細は第1部参考資料1(P50) を参照)。

最近では、複数の衛星観測をつなげた長期間のデータにもとづいて、こういったトレンド 解析がおこなわれている。一方最新の衛星観測結果から、これまでオゾンの日周変動成分は 小さく無視できるとされていた中部・下部成層圏でも、オゾンの日周変動が明瞭に検出され ている(第1部参考資料13参照)。そういった成果を踏まえ、最新のオゾンアセスメントレポ ートでは、成層圏領域におけるオゾンの日変化がトレンド解析に及ぼす影響(さまざまな手 法によるオゾン測定がその固有な観測時間によってバイアスを持ちうること)について述べ られている(WMO, 2015)。(詳細は第1部参考資料13(P75-76)を参照)。



図 1-3-6 オゾン量の 1980 年代の変化傾向(%/10 年)の緯度・高度分布 オゾン量の 1980 年代の変化傾向(%/10 年)。SAGE 衛星データで補正した最新の SBUV データを用いて

EESC フィッティングを行い、1980 年代のオゾンの変化傾向 (%/10 年)を求めたもの。等値線間隔は 2%。 薄い陰影部は 95%信頼区間で減少している領域。

(出典) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010 (WMO, 2011) より

(e) 2014 年のオゾン全量の状況

世界のオゾン全量偏差(%)の分布(2014年)

2014年の世界のオゾン全量の分布を図 1-3-7(上図)に、オゾン全量偏差(%)の分布を 図 1-3-7(下図)に示す。2014年の世界の年平均オゾン全量の分布を、オゾン量の減少傾向 が止まり、オゾン量がほぼ一定していた 1997~2006年の平均値の分布と比較すると、北半 球中高緯度では、3~4月と9月にグリーンランド付近上空で+10%以上の正偏差と、ヨーロ ッパ東部から東シベリア付近にかけて-10%以下の負偏差がみられた。グリーンランド付近 上空については大気循環の変動により例年よりも対流圏界面が低かったことに対応してい ると考えられる。低緯度域では、赤道付近で帯状に負偏差が広がっている。一方、これ以外 の低緯度域から南北中緯度にかけて正偏差が卓越した。このようなオゾン全量偏差のパタ ーンは QBO(準2年周期振動)の影響が大きいと考えられる。南極大陸のほとんどの領域 で 1997~2006年の平均値より多く、一部で+10%以上となった。これは、南極オゾンホー ルが例年と同程度か小さい規模で推移したことと対応している。



(上図) 月平均オゾン全量(matm·cm)の年平均分布図および(下図) 月平均オゾン全量偏差(%)の年平 均分布図。(上図)の等値線は15matm·cm間隔(下図)の等値線は2.5%間隔。1997~2006年の平均値を比 較の基準とした。北緯60度以北の1月と11~12月及び南緯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年平均を計算した。NASA提供の衛星観測データから作成。※口絵III参照。 (出典)気象庁 オゾン層・紫外線の年のまとめ(2014年)より