

# オゾン層・紫外線の年のまとめ (2014年)

平成27年8月  
気 象 庁



## はじめに

大気中のオゾンは上空約 10～50 km の高さに多く存在しており、この層をオゾン層と呼んでいます。オゾン層は太陽からの有害な紫外線を吸収し、地上の生態系を保護していますが、1980 年代初め以降、南極上空で「オゾンホール」と呼ばれる成層圏のオゾンが著しく少なくなる現象が毎年現れるようになり、これに代表されるオゾン層の破壊が赤道付近を除く両半球で確認されるようになりました。

オゾン層破壊の主因は、クロロフルオロカーボン類（日本では一般にフロン類と呼ぶ）等の人為起源のオゾン層破壊物質の大気への放出です。クロロフルオロカーボン類は成層圏へ運ばれると紫外線により分解され、塩素原子等を放出してオゾン層を破壊しますので、これによって地上に降り注ぐ有害な紫外線が増えるおそれがあります。

1980 年代半ばには世界的にオゾン層保護の機運が高まり、「オゾン層の保護のためのウィーン条約」や「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が採択され、オゾン層や紫外線の組織的な観測や研究、オゾン層破壊物質の規制等の国際的な枠組みが構築されました。わが国でも 1988 年に「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律」が施行され、今日までオゾン層保護の活動が積極的に続けられ、確かな成果をあげています。

こうした動きに対応して、気象庁では、自ら観測しているオゾン・紫外線のデータや国際的に収集した衛星データ等を用いて、オゾン層や地上での紫外線の状況を監視・解析しており、本書はその成果を取りまとめた年次報告書です。

本書の作成にあたり、気候問題懇談会検討部会に内容の査読にご協力をいただきました。ここに厚くお礼を申し上げます。

平成 27 年 8 月  
気象庁地球環境・海洋部

本書で用いるデータは本書を発行した時点での値であり、後に修正される可能性があります。最新のオゾン層・紫外線の図表・データ、あるいはオゾン層・紫外線に関する解説等については気象庁ホームページの下記サイトをご覧ください。

- ・各種データ・資料「オゾン層・紫外線」

[http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/diag\\_o3uv.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/diag_o3uv.html)

- ・知識・解説「オゾン層・紫外線」

<http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-0ozone.html>

- ・観測方法

（オゾン層）[http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-15ozone\\_observe.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-15ozone_observe.html)

（紫外線）[http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/3-45uvb\\_observe.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/3-45uvb_observe.html)

- ・オゾン層破壊物質に関する観測成果

[http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/cfcs\\_trend.html](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/cfcs_trend.html)

# 目次

|  |    |
|--|----|
| <b>第1章 2014年のオゾン層・紫外線の状況</b> .....     | 1  |
| 1-1 2014年の世界のオゾン層.....                 | 1  |
| 1-2 2014年の南極オゾンホール.....                | 5  |
| 1-3 2014年の北半球高緯度のオゾン層.....             | 9  |
| 1-4 2014年の日本上空のオゾン層.....               | 11 |
| 1-5 2014年の日本の紫外線.....                  | 13 |
| 1-6 2014年の南極域の紫外線.....                 | 14 |
| <b>第2章 オゾン層・紫外線の長期変化</b> .....         | 16 |
| 2-1 世界のオゾン層の長期変化.....                  | 16 |
| 2-2 南極オゾンホールの長期変化.....                 | 20 |
| 2-3 北半球高緯度のオゾン層の長期変化.....              | 24 |
| 2-4 日本上空のオゾン層の長期変化.....                | 26 |
| 2-5 日本および南極域の紫外線の長期変化.....             | 30 |
| <b>資料</b> .....                        | 33 |
| 資料1 南極各国基地におけるオゾン全量(2014年).....        | 33 |
| <b>付録</b> .....                        | 34 |
| 付録1 解析に使用した観測資料.....                   | 34 |
| 付録1-1 地上観測データ(オゾン).....                | 34 |
| 付録1-2 地上観測データ(紫外線).....                | 35 |
| 付録1-3 衛星観測データ(オゾン).....                | 36 |
| 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..... | 38 |
| 付録3 オゾン量の長期変化傾向の評価方法について.....          | 40 |
| <b>用語解説</b> .....                      | 41 |
| <b>参考文献</b> .....                      | 44 |
| <b>オゾン層破壊の科学アセスメント：2014</b>            |    |
| <b>政策決定者向けアセスメント 総括要旨</b> .....        | 45 |
| <b>謝辞</b> .....                        | 49 |

## 第1章 2014年のオゾン層・紫外線の状況

### 【要約】

#### オゾン層

2014年のオゾン全量は、南極大陸のほとんどの領域で1997～2006年平均より多く、一部は10%以上多かった。

2014年の南極オゾンホール面積の最大値は2,340万km<sup>2</sup>で過去10年の平均値と同程度だった。2014年のオゾンホールの季節(8～12月)における南極昭和基地上空の月平均オゾン全量は、1994～2008年平均と同程度だった。

2014年春季の北半球高緯度では、極域成層圏雲に関連したオゾン層破壊が起きた可能性があるが、2011年の事例ほど顕著ではなかった。

2014年の札幌、つくば、那覇、南鳥島の月平均オゾン全量は、札幌とつくばでは1994～2008年平均と同程度の月が多かった。那覇と南鳥島は秋から冬にかけて同期間平均より多かった。

#### 紫外線

2014年の紅斑紫外線量は、つくばでは年を通じて1994～2008年平均と同程度が多かった。

札幌の紅斑紫外線量は10月のみ同期間平均より少なかった。また、那覇の紅斑紫外線量は8月及び12月のみ同期間平均より少なかった。

2014年の南極昭和基地における紅斑紫外線量は、1994～2008年平均と同程度だった。

### 1-1 2014年の世界のオゾン層

2014年の世界のオゾン全量年平均値の分布図を図1-1aに示す。また、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年平均<sup>1</sup>(以下、平均値)との偏差の分布図を図1-1bに示す。これによれば、低緯度域の赤道付近で帯状に負偏差が広がっており、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。巻末「用語解説」参照)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は平均値より多く、一部で+10%以上となった(詳細は1-2節参照)。

北半球中高緯度では、グリーンランド付近で+2.5%以上の正偏差と中央シベリアからロシア西部付近にかけて-2.5%以下の負偏差が広がった。

図1-2に示した世界の月平均オゾン全量・偏差分布図をみると、3～4月と9月にグリーンランド付近で+10%以上の正偏差となっており、これは大気循環の変動により圏界面が例年より低かったことに対応しているとみられる(大気循環場の資料は気象庁ホームページを参照：[http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/diag/db\\_hist\\_mon.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/diag/db_hist_mon.html))。一方、2～4月に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、これは極域成層圏雲(巻末「用語解説」参照)の発生によるオゾン層破壊に関連している可能性があるが、2011年の事例ほど顕著なオゾン量の減少ではなかった(詳細は1-3節参照)。

<sup>1</sup> 本報告書では、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1994～2008年の平均値との差に注目して記述しているが、衛星観測によるオゾン全量については、データの一部が存在しない等の理由により、1997～2006年の平均値を比較の対象としている。巻末の「用語解説」、「参照値」を参照のこと。

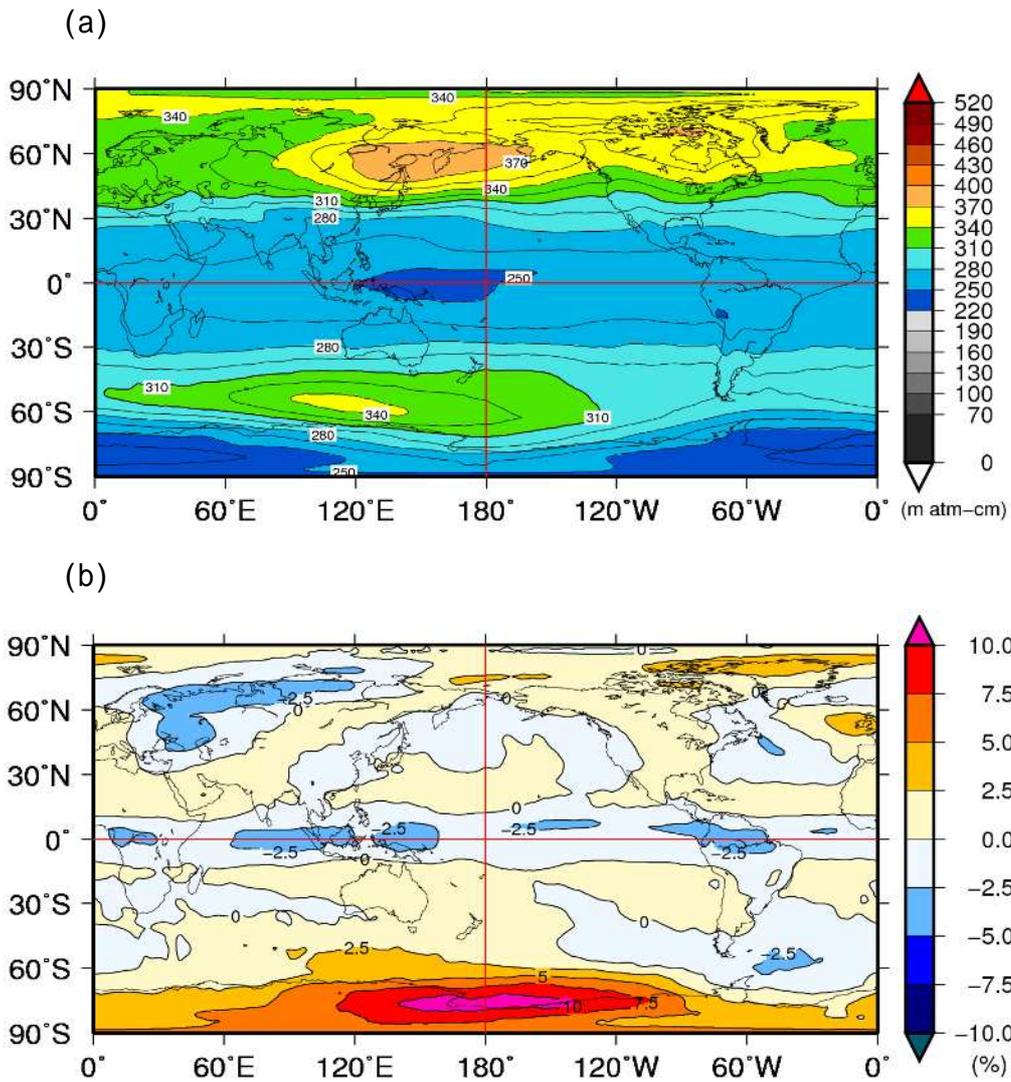


図1-1：2014年の世界のオゾン全量 (a) および偏差 (b) の年平均分布図

(a) 月平均オゾン全量 (m atm-cm) の年平均分布図および (b) 月平均オゾン全量偏差 (%) の年平均分布図。(a) の等値線は15 m atm-cm間隔、(b) の等値線は2.5%間隔。(b) の比較の基準は1997～2006年の累年平均値。それぞれ年平均値は、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月の太陽高度角の関係で観測できない時期を除いて計算した。NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。

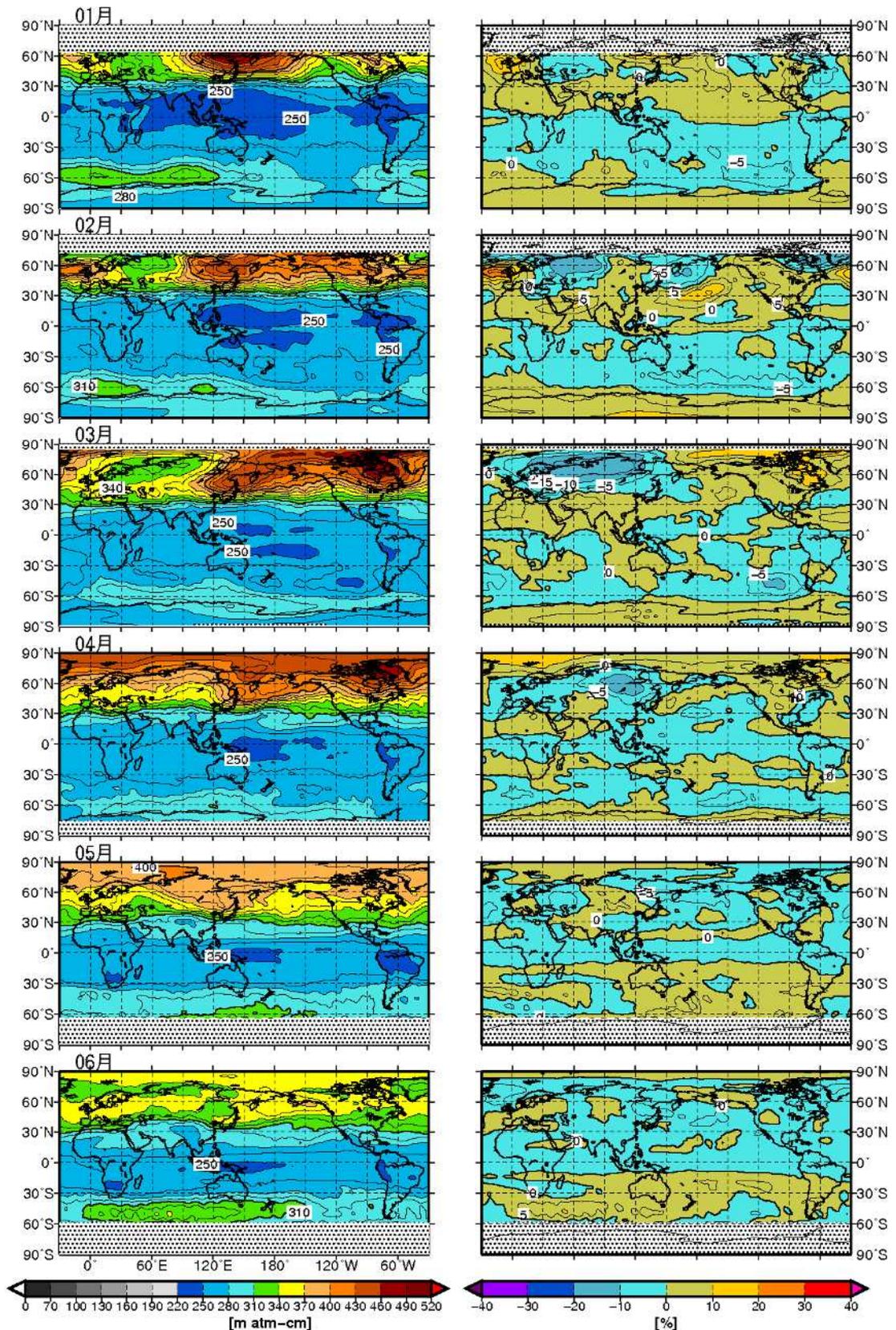


図1-2a：世界の月平均オゾン全量・偏差分布図（2014年1～6月）

等値線間隔は、月平均オゾン全量（左列）については15 m atm-cm、偏差（右列）については5%。陰影部は太陽高度角の関係で観測できない領域。比較の基準は1997～2006年の月別累年平均値。NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。

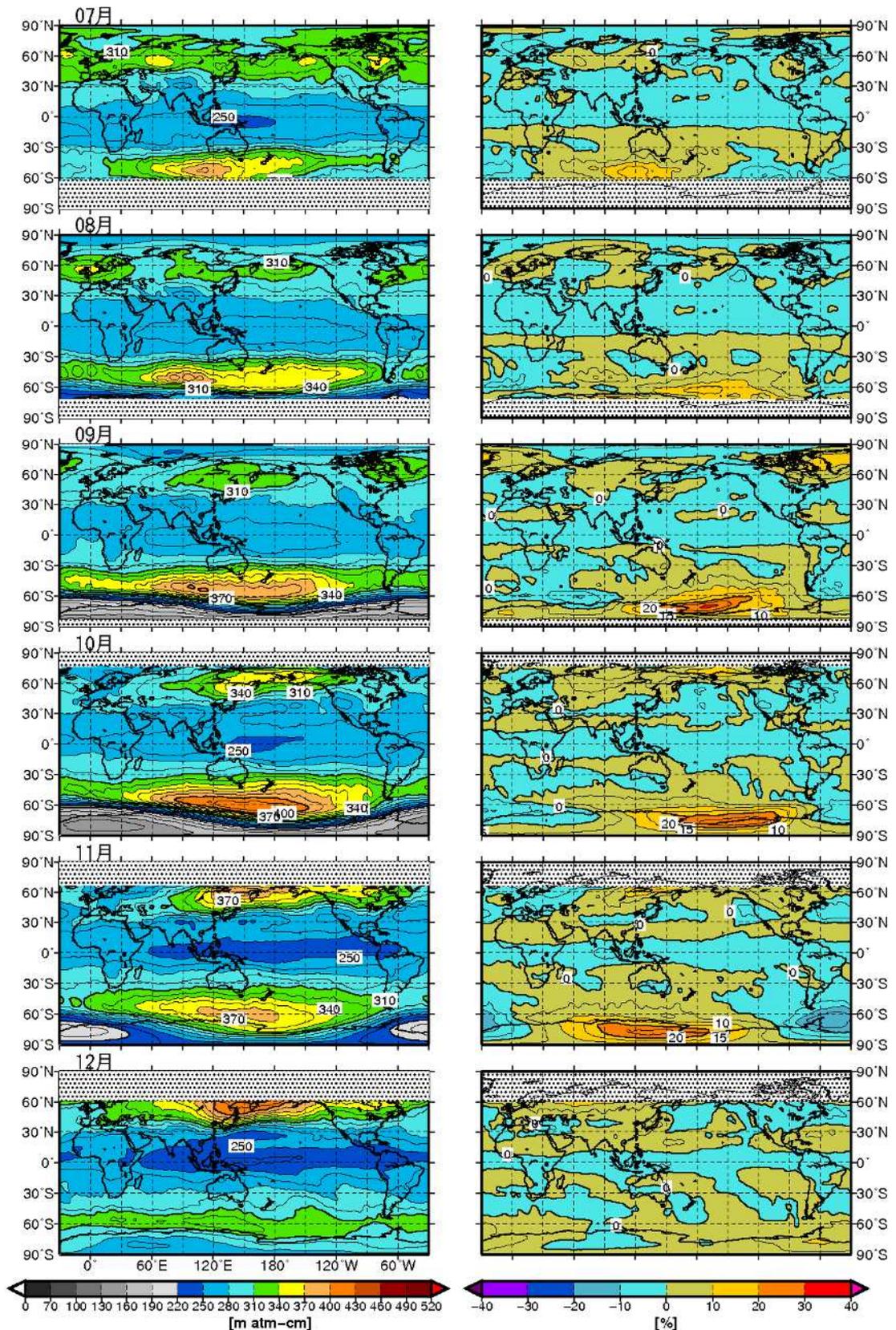


図1-2b：世界の月平均オゾン全量・偏差分布図（2014年7～12月）

等値線間隔は、月平均オゾン全量（左列）については15 m atm-cm、偏差（右列）については5%。陰影部は太陽高度角の関係で観測できない領域。比較の基準は1997～2006年の月別累年平均値。NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。



## 1 - 2 2014年の南極オゾンホール

### 衛星による観測

衛星観測データ（付録 1-3 参照）の日別値から求めた 2014 年の南極オゾンホール（巻末「用語解説」を参照）の規模の推移を、図 1-3 に示す。2014 年の南極オゾンホールは、例年と同様に 8 月に発生したのち9月初めに急速に拡大し、9月後半には一時的に縮小したものの10月1日に2014年の最大面積である 2,340 万 km<sup>2</sup>（南極大陸の約 1.7 倍）まで広がった。その後、過去（2004～2013 年）の平均と同程度のペースで縮小し、12 月初めに消滅した（図 1-3a）。オゾン欠損量は 10 月 2 日に年最大値である 7,850 万トン、最低オゾン全量は 9 月 30 日に年最低値である 114 m atm-cm となった。

2014年の最大面積は、過去（2004～2013年）の平均値（2,460万km<sup>2</sup>）と同程度だった。2014年のオゾン欠損量の年最大値は、過去（2004～2013年）の平均値（8,280万トン）と同程度だった。

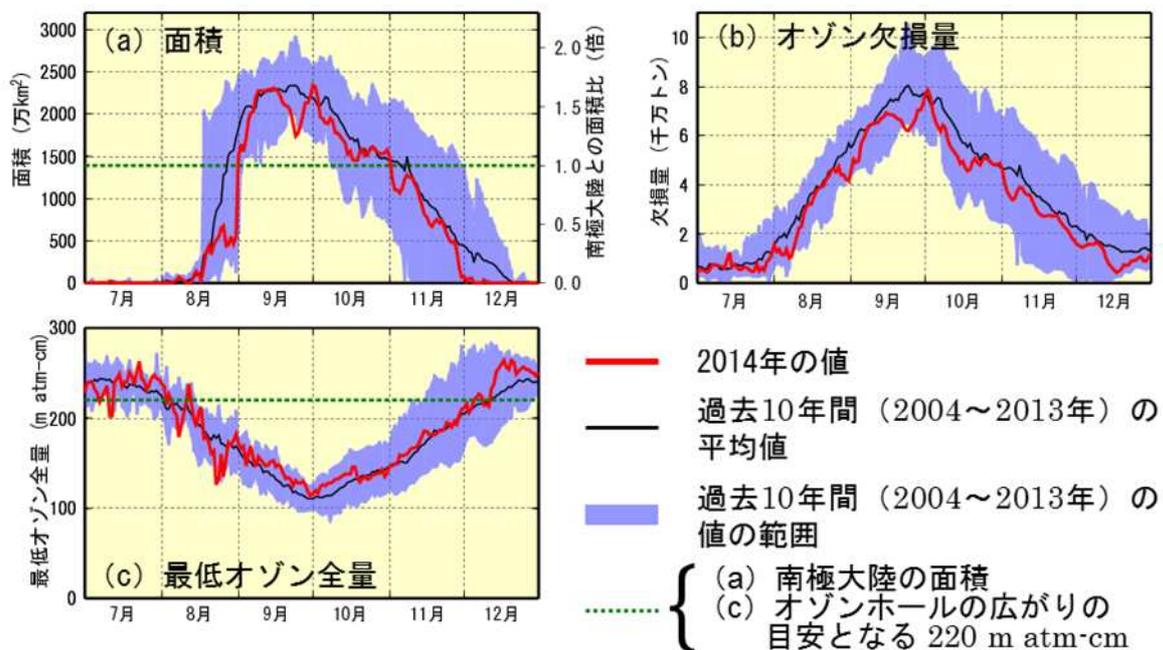


図1-3：オゾンホールの規模（2014年7～12月）  
NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。

### 南極昭和基地における地上観測

昭和基地で観測した2014年のオゾン全量日代表値の推移を図1-4に示す。

2014年の昭和基地上空のオゾン全量は、8月中旬から南極オゾンホールが目安である220 m atm-cmを下回る日があり、9～10月は概ねこの値以下で経過した。また、10月7日に2014年の最小値である142 m atm-cmを記録した。11月初めから中旬にかけて短い周期で顕著な増減を繰り返した後は220 m atm-cmを上回り、オゾンホール消滅後の12月中旬に急増して300 m atm-cm以上となった。11月にみられた大きな変動は、南極オゾンホールが移動または変形して、昭和基地がオゾンホールの外に出たり内側に入ったことに対応する。

2014年のオゾンホールの季節(8～12月)における南極昭和基地上空の月平均オゾン全量は、1994～2008年並だった(図1-5)。

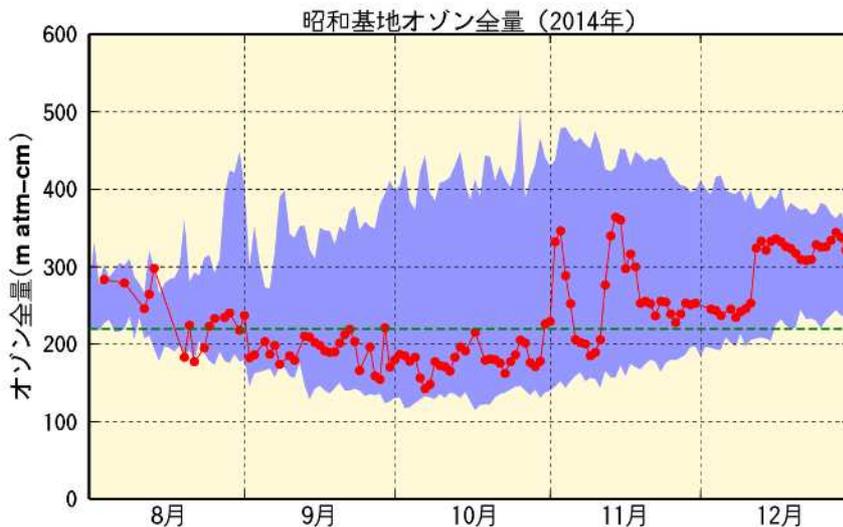


図1-4：南極昭和基地におけるオゾン全量日代表値(2014年8～12月)

は2014年の観測値(日代表値)。濃い青色の領域の上端と下端は観測開始(1961年)以来の最大および最小値。緑色の破線は南極オゾンホールの目安である220 m atm-cmを示す。

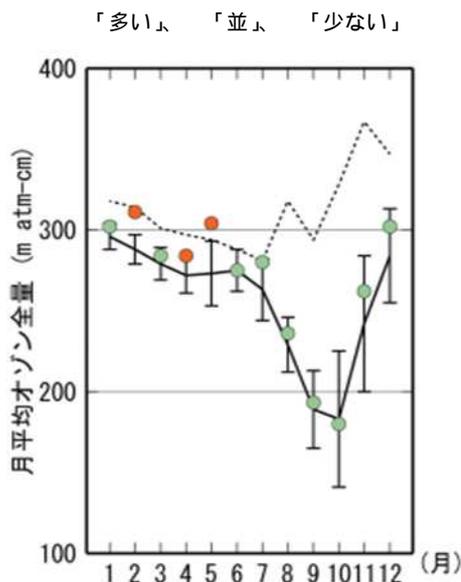


図1-5：2014年の南極昭和基地における月平均オゾン全量

印は2014年の月平均値。実線は1994～2008年の累年平均値で、縦線はその標準偏差である。点線はオゾンホールが出現する以前の1961～1980年の累年平均値。

1994～2008年の累年平均値からの差が標準偏差以内のときを「並」、それより大きいときを「多い」、それより小さいときを「少ない」とした。

### 南極昭和基地におけるオゾンゾンデ観測

南極オゾンホール鉛直構造の特徴は、通常オゾンが多い高度14～22 km付近におけるオゾンが大きく減少することである。2014年の昭和基地上空におけるオゾン分圧（巻末「用語解説」参照）の鉛直分布を図1-6に示す。2014年も例年と同様に8月まで10 mPa以上となっていた高度14～22 km付近のオゾン分圧が、9月中旬～10月下旬にかけて2.5 mPa以下となった。11月に入ると、高度16 km付近以上で短い周期で増減が見られ、12月中旬には高度14～22 km付近で急増して10 mPa以上に戻った。こうした変動は図1-4のオゾン全量の変動とおおよそ対応している。

月平均値の規格化偏差（図1-6b）をみると、2月の高度18 km付近および高度22 km付近と5月の高度11 km付近で規格化偏差が+3以上となり、+4以上となった時期もあった。

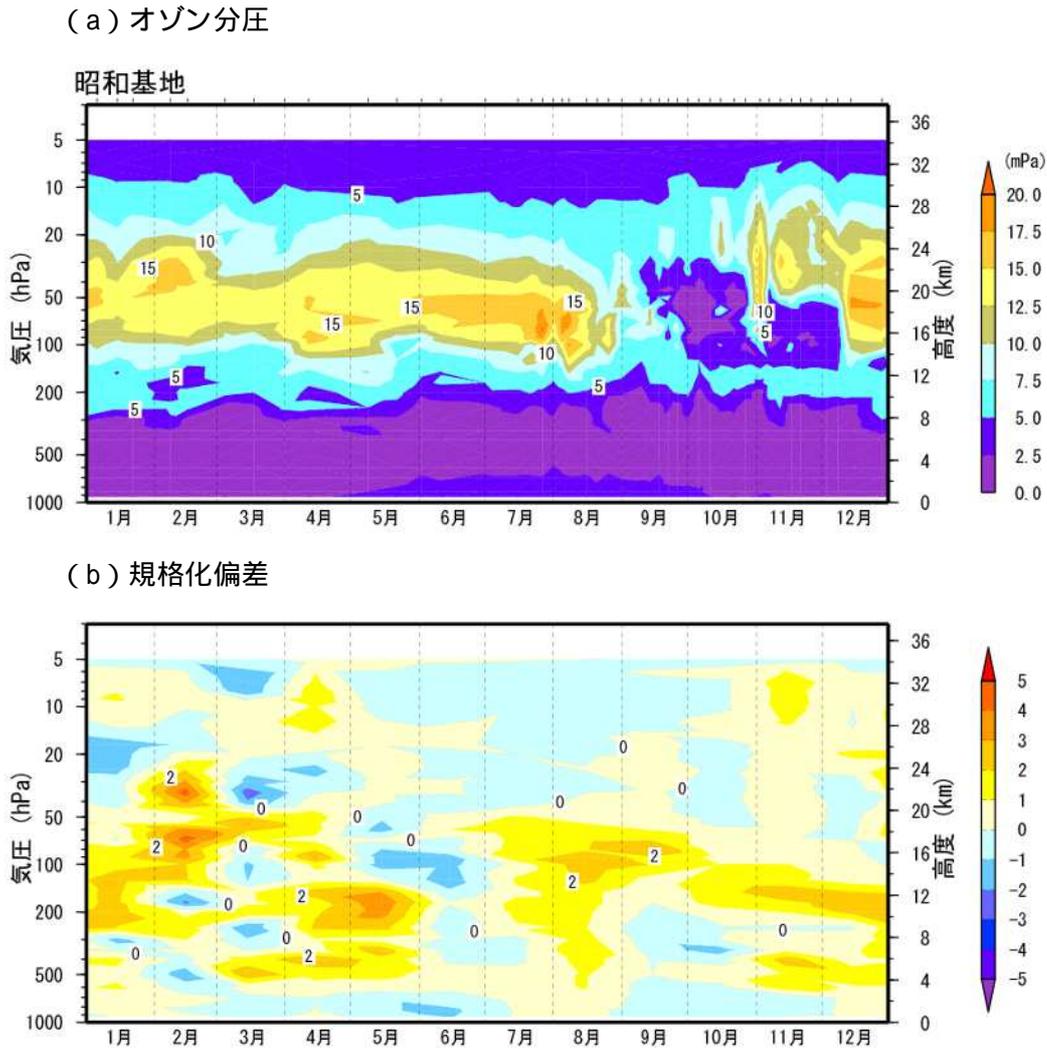


図1-6：南極昭和基地の (a) オゾン分圧と (b) その規格化偏差の高度分布（2014年1～12月）

オゾン分圧図 (a) は個々の観測値を、規格化偏差図 (b) は月平均値を用いて作成。規格化偏差は月平均値の1994～2008年の累年平均値からの偏差を標準偏差で割った値。観測データの無い高度については、前後の期間のオゾン分圧から内挿処理を行っている。なお、1994～2008年の累年平均値および標準偏差の図は、気象庁ホームページ ([http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-20ozone\\_avemap.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-20ozone_avemap.html)) に掲載している。

## 2014年のオゾンホールに関連する下部成層圏の気象状況

南極オゾンホールの形成に大きな役割を果たす極域成層圏雲（巻末「用語解説」参照）が生成されるための気象条件は、南半球の冬季から春季にかけて極渦が安定し下部成層圏の低温（ $-78$  以下の低温）が持続することである。冬季の極域成層圏の低温の面積が大きいほど、その年の南極オゾンホールの規模が大きくなる傾向がある。

2014年の南極下部成層圏（50 hPa）の領域最低気温（図1-7a）は、例年と同じ5月上旬～10月中旬の期間は $-78$  以下であり、6月中旬から9月下旬まで過去の平均値（1979～2013年）より低いことが多かったが、7月下旬及び9月上旬に一時的に上昇した。また、南極オゾンホールの規模と密接な関係のある $-78$  以下の領域の面積（図1-7b）も、6月中旬から10月上旬まで過去の平均値より大きいことが多かったが、9月上旬に一時的に縮小している。南極オゾンホールの面積（図1-3a）も、この影響を受けて9月中旬に一旦縮小したが、その後再び拡大し、10月以降は過去の平均と同程度の規模で推移し、12月上旬に消滅した。

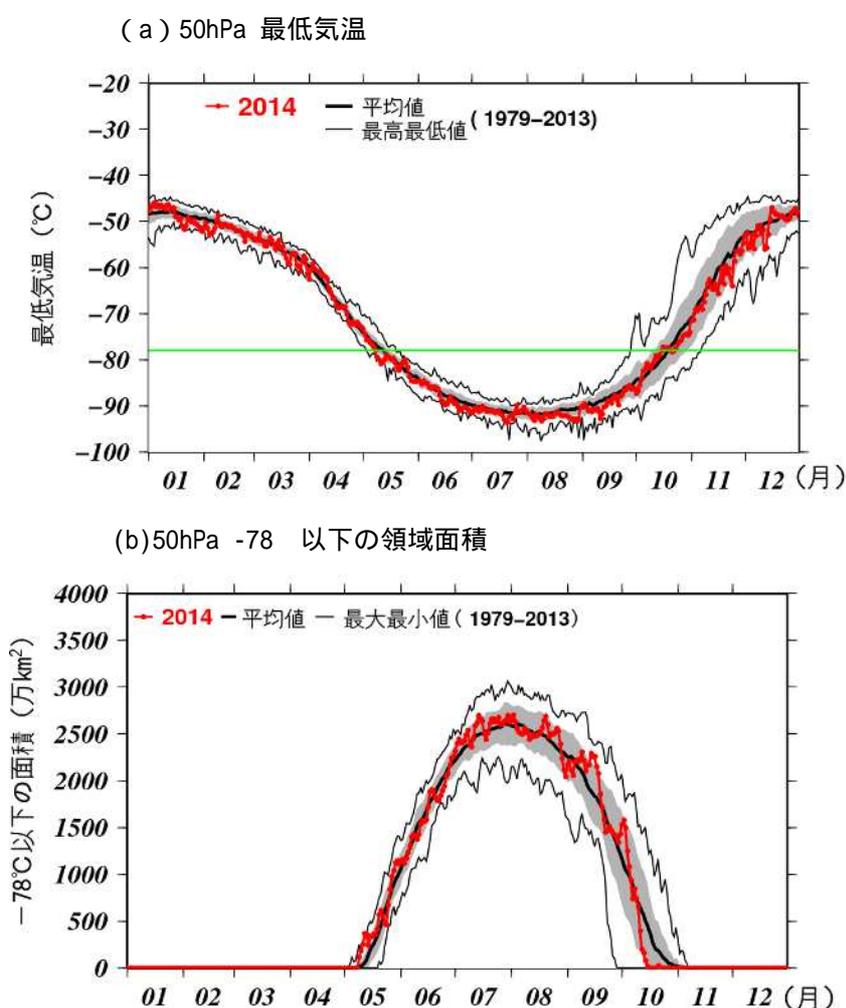
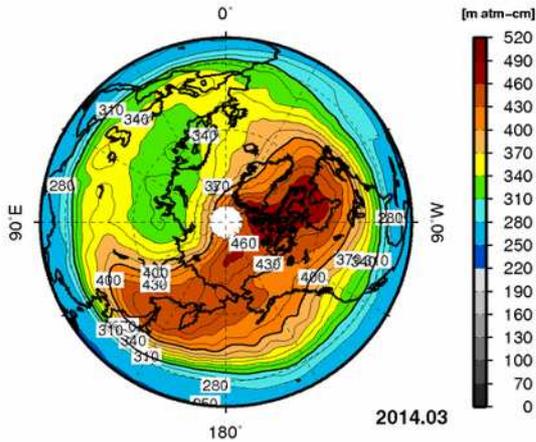


図1-7：2014年の南極域上空の (a) 下部成層圏の最低気温および (b) 気温が $-78$  以下の領域の面積  
2014年の南緯60度以南の50 hPa（高度約20 km）面における (a) 日別の領域最低気温と (b) 極域成層圏雲の出現する目安となる $-78$  以下の領域の面積。陰影中の黒太実線は1979～2013年の累年平均値。陰影の外の黒細実線は同期間の最高（最大）値および最低（最小）値。陰影は標準偏差の範囲。(a) の緑線は極域成層圏雲出現の目安である $-78$ 。JRA-55解析値(Kobayashi *et al.*, 2015)をもとに作成。JRA-55については巻末「用語解説」を参照。

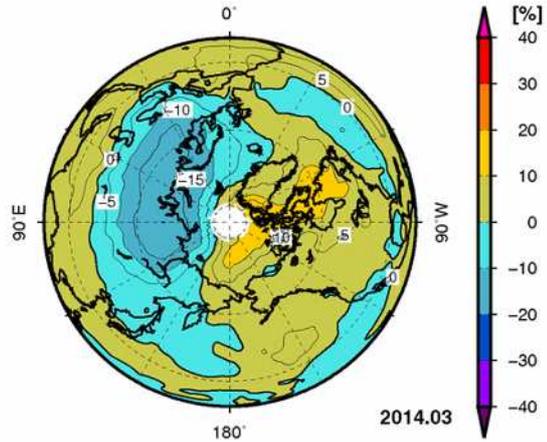
### 1 - 3 2014年の北半球高緯度のオゾン層

2014年春季の北半球高緯度では、2～3月にヨーロッパ東部から東シベリアにかけて、1997～2006年平均と比較して-10%以下のオゾン全量偏差の負偏差域が広がった。図1-8a、bに、2014年3月の北半球高緯度におけるオゾン全量及びオゾン全量偏差の分布図を示す。こうしたオゾン全量の減少は、後述の下部成層圏の気温状況から極域成層圏雲に関連した可能性があるが、2011年3月にみられたような顕著なものではなかった(図1-8c、d)。

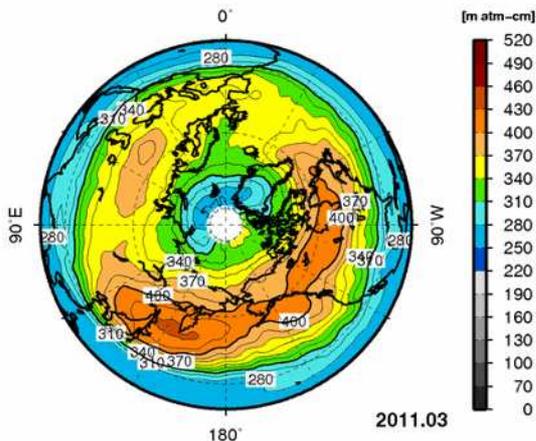
(a) 2014年3月のオゾン全量



(b) 2014年3月のオゾン全量偏差(%)



(c) 2011年3月のオゾン全量



(d) 2011年3月のオゾン全量偏差(%)

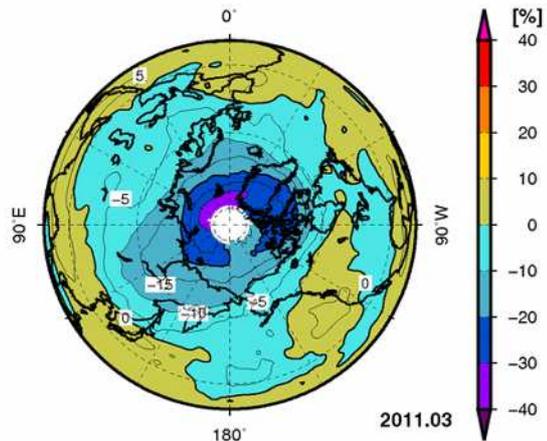


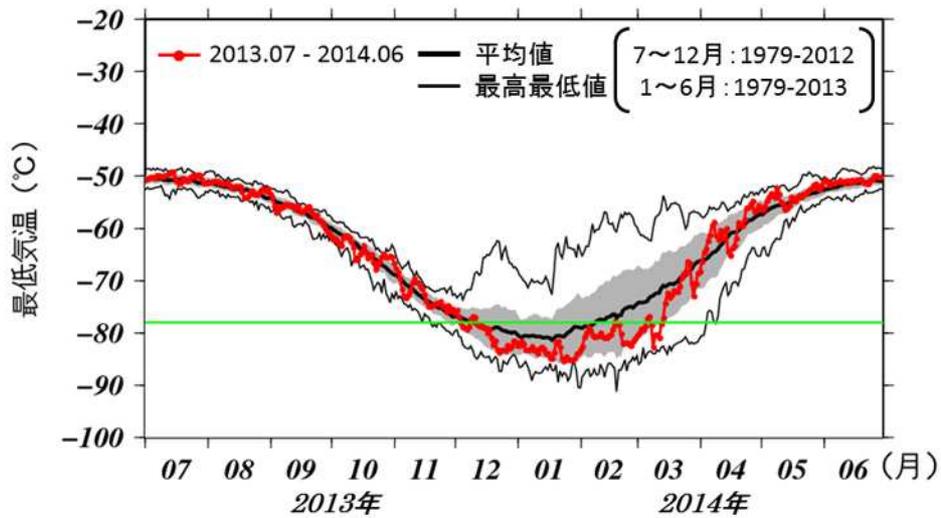
図1-8 : 2014年3月および2011年3月の北半球の (a) (c)月平均オゾン全量、(b) (d)偏差(%)分布図

等値線間隔は、月平均オゾン全量については15 m atm-cm、偏差については5%。北極点付近の白色域は太陽高度角の関係で観測できない領域。比較の基準である参照値は1997～2006年の月別累年平均値。NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。

### 2013/2014年の北半球高緯度下部成層圏の気象状況

図1-9aに2013年7月～2014年6月までの北半球高緯度における下部成層圏（50 hPa面）の北緯60度以北の領域内における最低気温、図1-9bに-78℃以下の領域の面積を示す。下部成層圏の最低気温は、2013年12月上旬から-78℃以下となり、その後は2014年3月中旬までほぼ過去の平均値より低く推移し、3月下旬以降は-78℃を上回った。極域成層圏雲出現の目安である-78℃以下の領域の面積は、2013年12月中旬～2014年2月中旬までほぼ過去の平均値より大きく推移し、2014年2月下旬にも一時的に拡大した。このように、オゾン全量が少ない領域がみられた時期の前に、極域成層圏雲が出現する目安である-78℃以下の領域の面積が大きい状況が2か月程度持続していたことから、2014年冬季から春季には、極域成層圏雲に関連したオゾン層の破壊が起きた可能性があると考えられる。

(a) 50hPa 最低気温



(b) 50hPa -78℃以下の領域面積

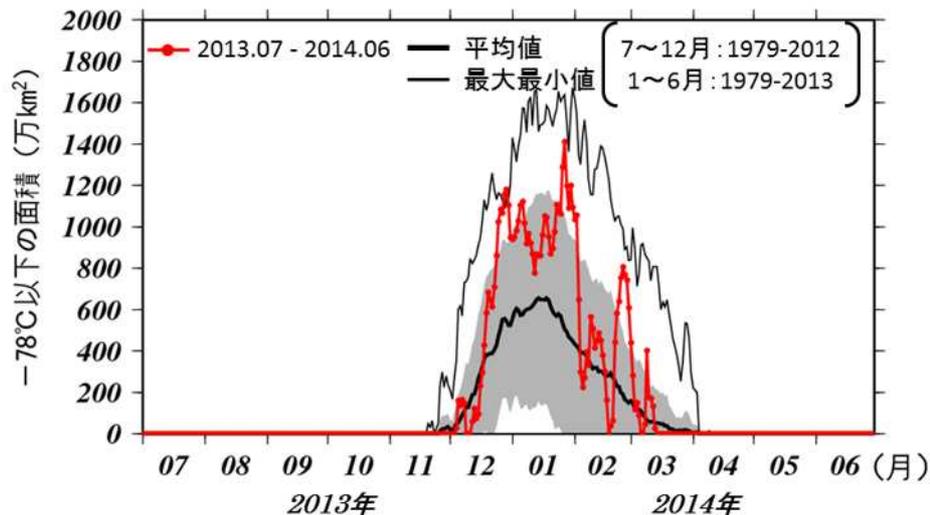


図1-9：北半球高緯度下部成層圏の(a) 最低気温および (b) 気温が-78℃以下の領域の面積（2013年7月～2014年6月）

赤実線は2013年7月～2014年6月の北緯60度以北の50 hPa（高度約20 km）面における（a）日別の最低気温と（b）極域成層圏雲の出現する目安となる-78℃以下の領域の面積。黒太線は累年平均値で、7～12月は1979～2012年、1月～6月は1979～2013年の平均値。陰影の外の黒細実線は同期間の最高（最大）値および最低（最小）値。ただし、気温が-78℃以下の領域の面積の最小値は一年を通して0 km<sup>2</sup>である。陰影は標準偏差の範囲。（a）の緑線は極域成層圏雲出現の目安である-78℃を示す。JRA-55解析値（Kobayashi *et al.*, 2015）をもとに作成。JRA-55については巻末「用語解説」を参照。

## 1 - 4 2014年の日本上空のオゾン層

### 2014年のオゾン全量の状況

気象庁が観測を行っている札幌、つくば、那覇、南鳥島のオゾン全量について2014年における月平均値を図1-10に示す。

これによれば、那覇で年の初めと終わりに1994～2008年の平均値より多く、12月にはその月として観測開始（1975年）以来最大となった。札幌とつくばでは全般に平均値に近かった。

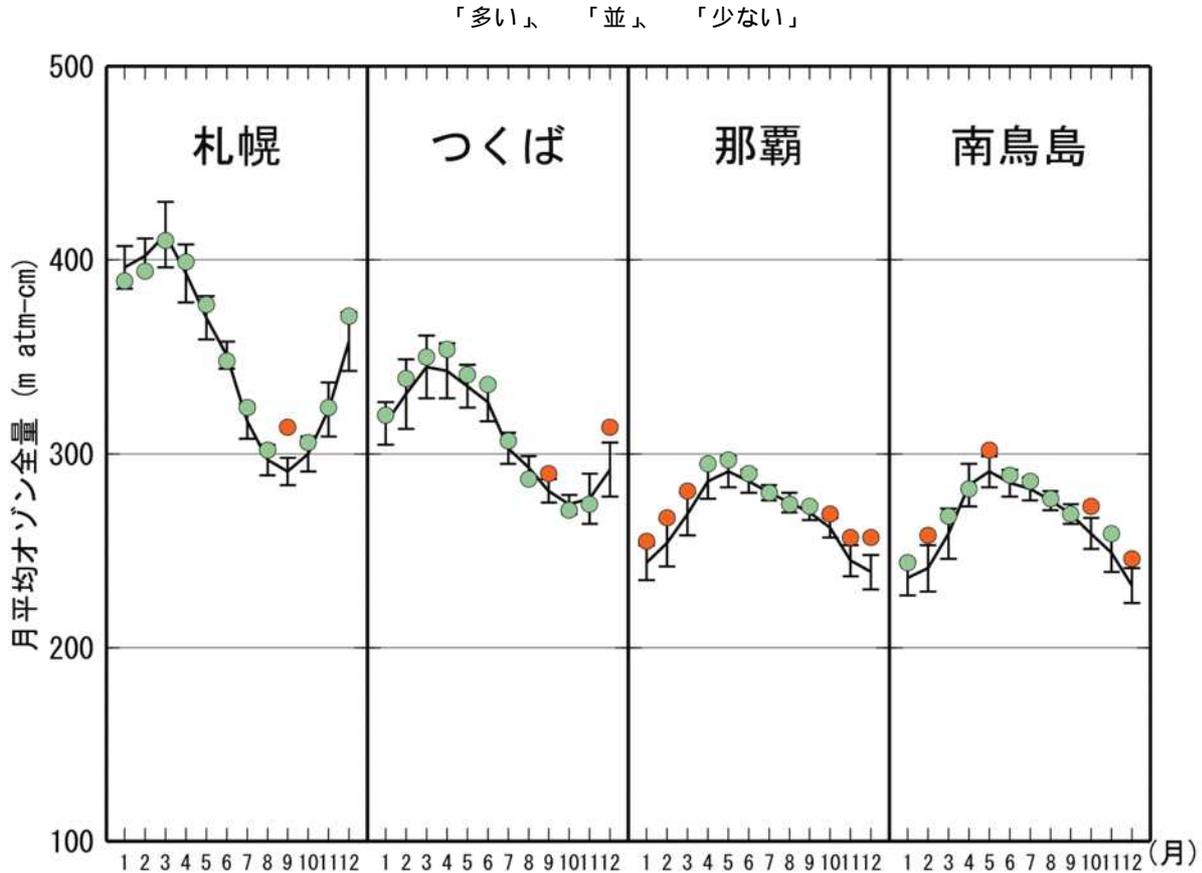


図1-10：2014年の日本上空の月平均オゾン全量

国内4地点（札幌、つくば、那覇、南鳥島）における月平均オゾン全量の年変化。印は2014年の月平均値。折線（実線）は1994～2008年の累年平均値。縦線は標準偏差。

参照値からの差が標準偏差以内のときを「並」、それより大きいときを「多い」、それより小さいときを「少ない」とした。

## 2014年のオゾンの高度分布の状況

オゾンゾンデ観測による日本上空のオゾン分圧および規格化偏差の高度分布を図1-11に示す。オゾン分圧(図1-11a)をみると、気象庁が観測を行っている札幌、つくば、那覇の3地点ともに高度24 km付近でオゾン分圧の高い層がみられた。札幌とつくばでは1~4月、12月に特に高い。那覇では6月に高かった。規格化偏差でみると(図1-11b)、3地点とも高度28 km付近より上層では負偏差が卓越し、これより下層では正偏差が卓越した。また、下部成層圏の高度20 km付近の層で+2以上の正偏差がみられ、札幌、那覇では6月以降しばしば、つくばでは10月に+3以上の偏差がみられた。対流圏(地上から高度約10 km付近まで)では、札幌の2月、つくばの7月に特に大きな偏差(+5以上)がみられた。

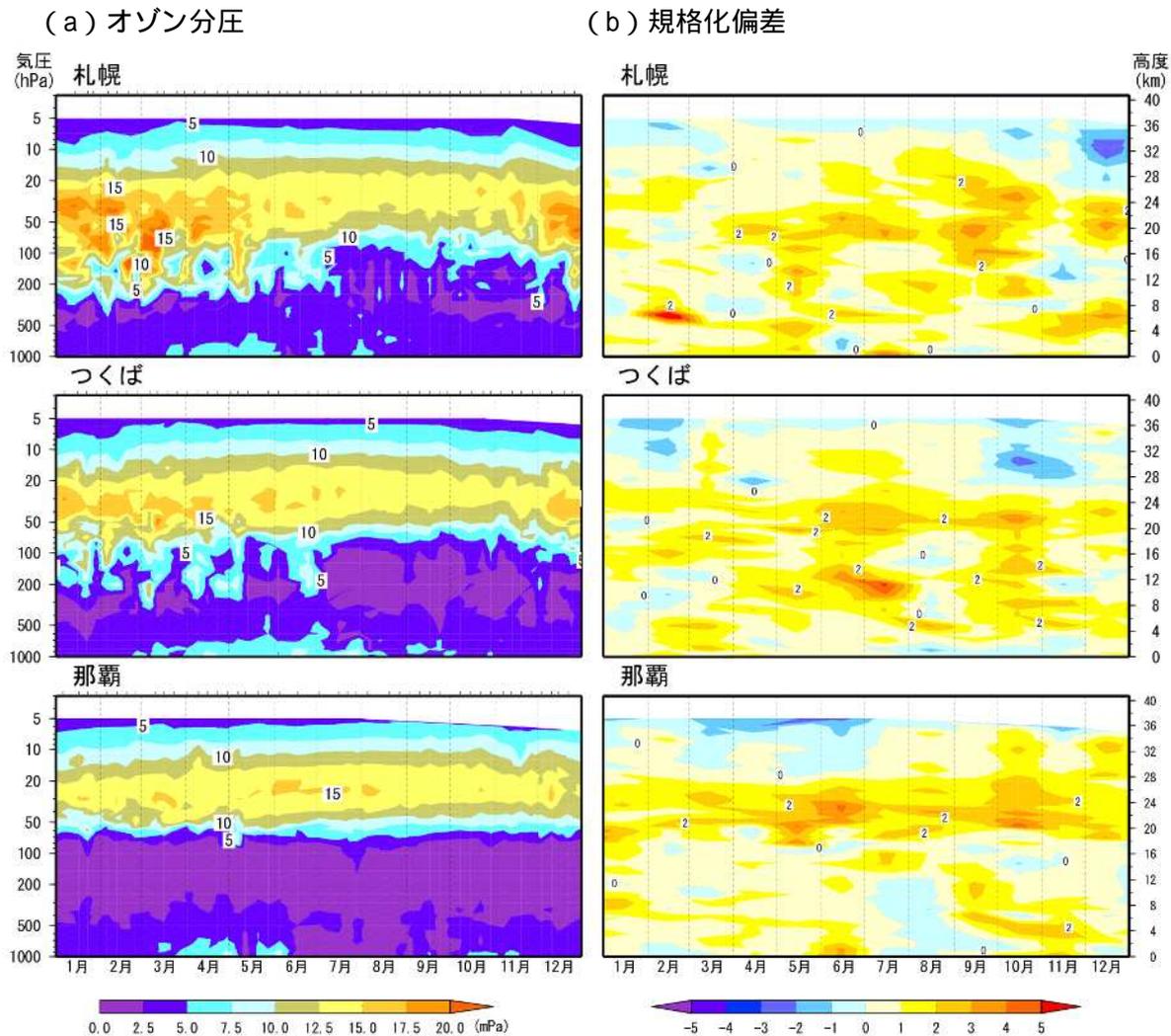


図1-11：国内3地点のオゾン分圧・規格化偏差の高度分布（2014年）

札幌、つくば、那覇のオゾンゾンデ観測による (a) オゾン分圧、(b) 規格化偏差の高度分布図。オゾン分圧図 (a) は個々の観測値を、規格化偏差図 (b) は月平均値を用いて作成。比較の基準は、1994~2008年の累年平均値。規格化偏差は観測値(月平均値)の参照値からの偏差を標準偏差で割った値。観測データの無い高度については、前後の期間のオゾン分圧から内挿処理を行っている。なお、各地点の参照値および標準偏差の図は、気象庁ホームページ「オゾンの世界分布と季節変化」([http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-20ozone\\_avemap.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-20ozone_avemap.html))に掲載している。



## 1 - 5 2014年の日本の紫外線

国内3地点(札幌、つくば、那覇)における紅斑紫外線量日積算値の2014年の月平均値を図1-12に示す。札幌とつくばでは春に1994~2008年の平均値を上回り、札幌の4月とつくばの5月にそれぞれその月として観測開始以来2位となった。那覇では、1月と7月にそれぞれの月として観測開始以来最大となった。これらの特徴は、各地点の天候(雲量や日照時間など)の状況と概ね整合している。

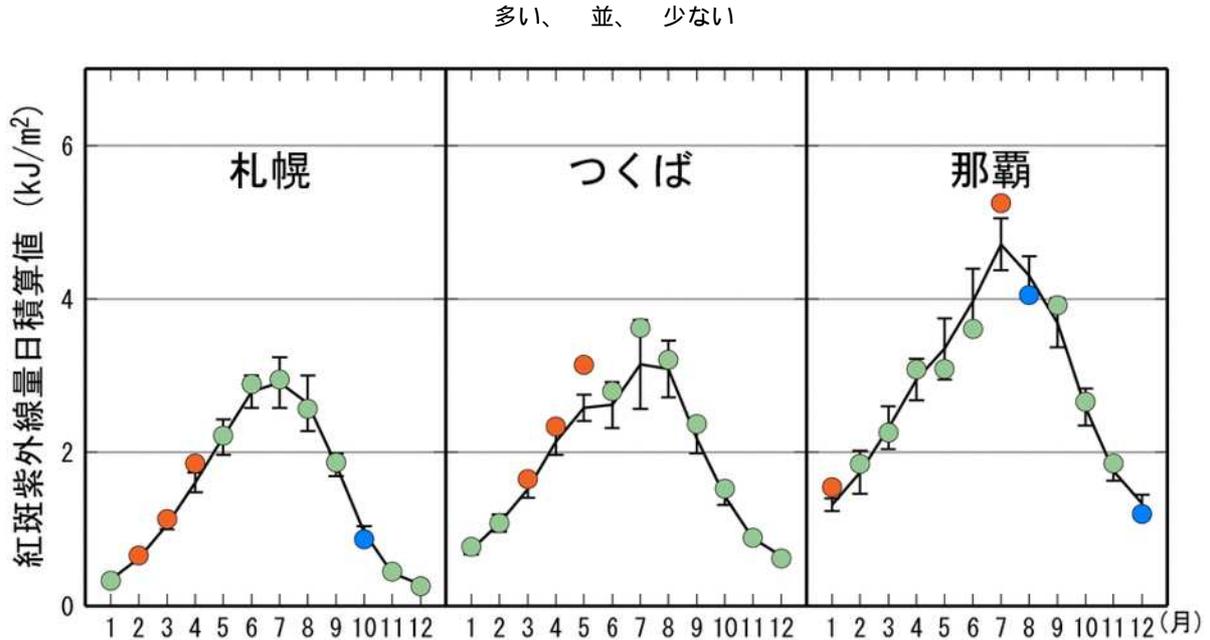


図1-12：2014年の紅斑紫外線量日積算値の月平均値

国内3地点(札幌、つくば、那覇)における紅斑紫外線量日積算値の月平均値。印は2014年の月平均値。実線は1994~2008年の累年平均値。縦線はその標準偏差。1994~2008年の累年平均値からの差が標準偏差以内のときを「並」、それより大きいときを「多い」、それより小さいときを「少ない」とした。

## 1 - 6 2014年の南極域の紫外線

南極昭和基地における紅斑紫外線量日積算値の2014年の月平均値は、いずれも1994～2008年平均値と同程度であった（図1-13）。

オゾン全量、全天日射量と紅斑紫外線量は密接な関係があることから、南極オゾンホールが存在する期間（8～12月）の昭和基地における紅斑紫外線量日積算値、オゾン全量及び全天日射量の推移を図1-14に示す。10月中旬以降、オゾン全量が1994～2008年の平均値より多いときは、紅斑紫外線量は少なくなったなど（11月上旬及び中旬）、それぞれの変動はよく対応して経過した。12月末の全天日射量の観測値が平均値より低いことから、この時期における紅斑紫外線量はオゾン全量が平均値より多くなったことに加え、悪天候の影響により一時的に大きく減少したと考えられる。

全天日射量日積算値の1994～2008年平均値は、極夜の明けた後の8～12月にかけて増加し、12月に最大となっている（図1-14青破線）。これは、南中時の太陽高度が高くなり、日照時間が長くなるためである。基本的には、紅斑紫外線量日積算値の平均値も全天日射量の季節変化に対応して変化するが、紅斑紫外線量の平均値のピークは全天日射量が最大になるより半月ほど前の11月下旬にみられる。これは、この時期、例年南極オゾンホールの解消期にあたり、オゾン全量（緑破線）が増加し、紫外線の吸収が日に日に強まるためである。

2014年の昭和基地における紅斑紫外線量は、例年ピークとなる11月下旬より少し後、12月上旬にピークをむかえた。これは、この時期オゾン全量が少なかったことに対応している。

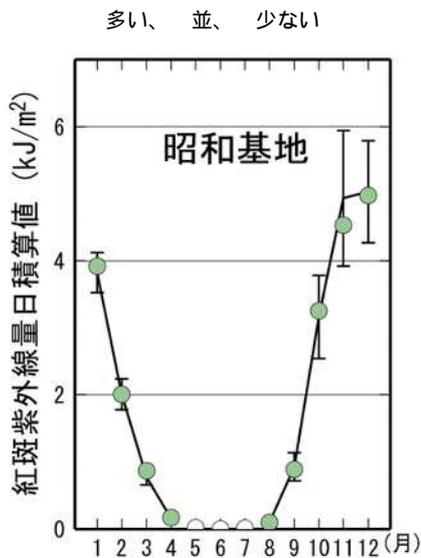
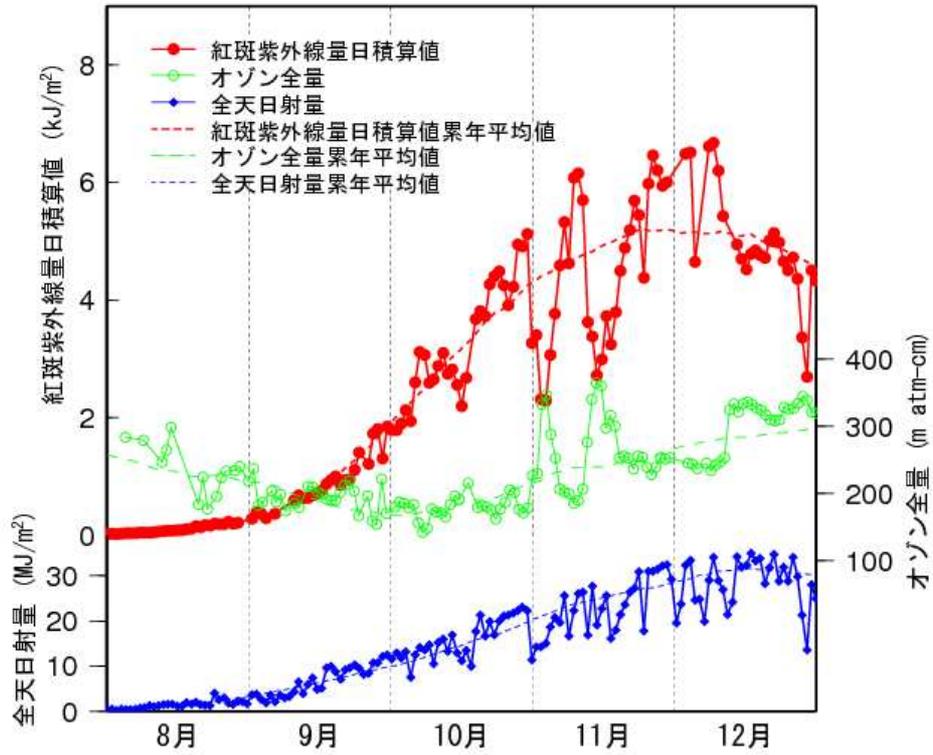


図1-13：2014年の紅斑紫外線量日積算値の月平均値

南極昭和基地における紅斑紫外線量日積算値の月平均値。印は2014年の月平均値。実線は1994～2008年の累年平均値、縦線はその標準偏差。ただし、極夜前後（5～7月）は平均値を算出していない。1994～2008年の累年平均値からの差が標準偏差以内のときを「並」、それより大きいときを「多い」、それより小さいときを「少ない」とした。



**図1-14 : 2014年の南極昭和基地における紅斑紫外線量日積算値、オゾン全量、全天日射量**  
 2014年の南極昭和基地における紅斑紫外線量日積算値、オゾン全量、全天日射量の観測値（実線）のほか、それぞれの日別値を1994～2008年まで平均した後15日移動平均をして求めた値（破線）を示す。

## 第2章 オゾン層・紫外線の長期変化

### 【要約】

#### オゾン層

世界全体のオゾン全量は、1990年代後半以降は減少傾向が止まり、2000年以降ではわずかな増加がみられるが、1970年代と比較すると少ない状態が続いている。

南極オゾンホール<sup>1</sup>の規模は1990年代半ばにかけて拡大したが、1990年代半ば以降は、年々変動はあるものの長期的な拡大傾向はみられなくなった。

春季の北半球高緯度におけるオゾン全量は、1990年以降、顕著な減少が数年おきに発生している。

国内のオゾン全量は、特に札幌とつくばで1990年代初めまで減少が進み、1990年代半ば以降は、国内各地点で緩やかな増加傾向がみられる。

#### 紫外線

札幌とつくばの紅斑紫外線量年積算値は、1990年代初め以降それぞれ10年あたり5%前後の割合で増加している。年間の日最大UVインデックス8以上の日数も各地点で増加している。

南極昭和基地での紫外線に大きな変化傾向は見られない。

### 2-1 世界のオゾン層の長期変化

#### 近年のオゾン全量の状況

1970～2014年までの地上および衛星からの観測による月別オゾン全量偏差を、世界全体、北半球中緯度、低緯度及び南半球全体について図2-1に示す。各月の値は1994～2008年の平均値に対する偏差(%)である。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。

地上観測データから求めた世界のオゾン全量偏差では、いずれの領域においても、過去5年間(2010～2014年)のオゾン全量の平均値は、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%低く、依然として1980年以前のレベルより低い状態が続いている。なお、南半球全体および低緯度はそれぞれ観測点が10地点および12地点と、北半球中緯度(40地点)に比べて少なく、精度が低い可能性がある。

世界全体のオゾン全量に2000年以降わずかな増加がみられることは、クロロフルオロカーボン類等のオゾン層破壊物質の大気中濃度が緩やかに減少していることと、自然変動によるオゾン量の増加が関係していると考えられている。北半球中緯度では、1990年代にオゾン全量の少ない時期が顕著に認められるが、これは、ピナトゥボ火山噴火(1991年6月)の影響<sup>2</sup>や北極域成層圏で低温となった冬が数回あったことにもない、オゾン破壊が促進されたためと考えられている(WMO, 2014)。

<sup>2</sup> ピナトゥボ火山噴火(1991年6月)にともない、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(巻末「用語解説」参照)によってオゾン破壊が促進された(WMO, 2011)

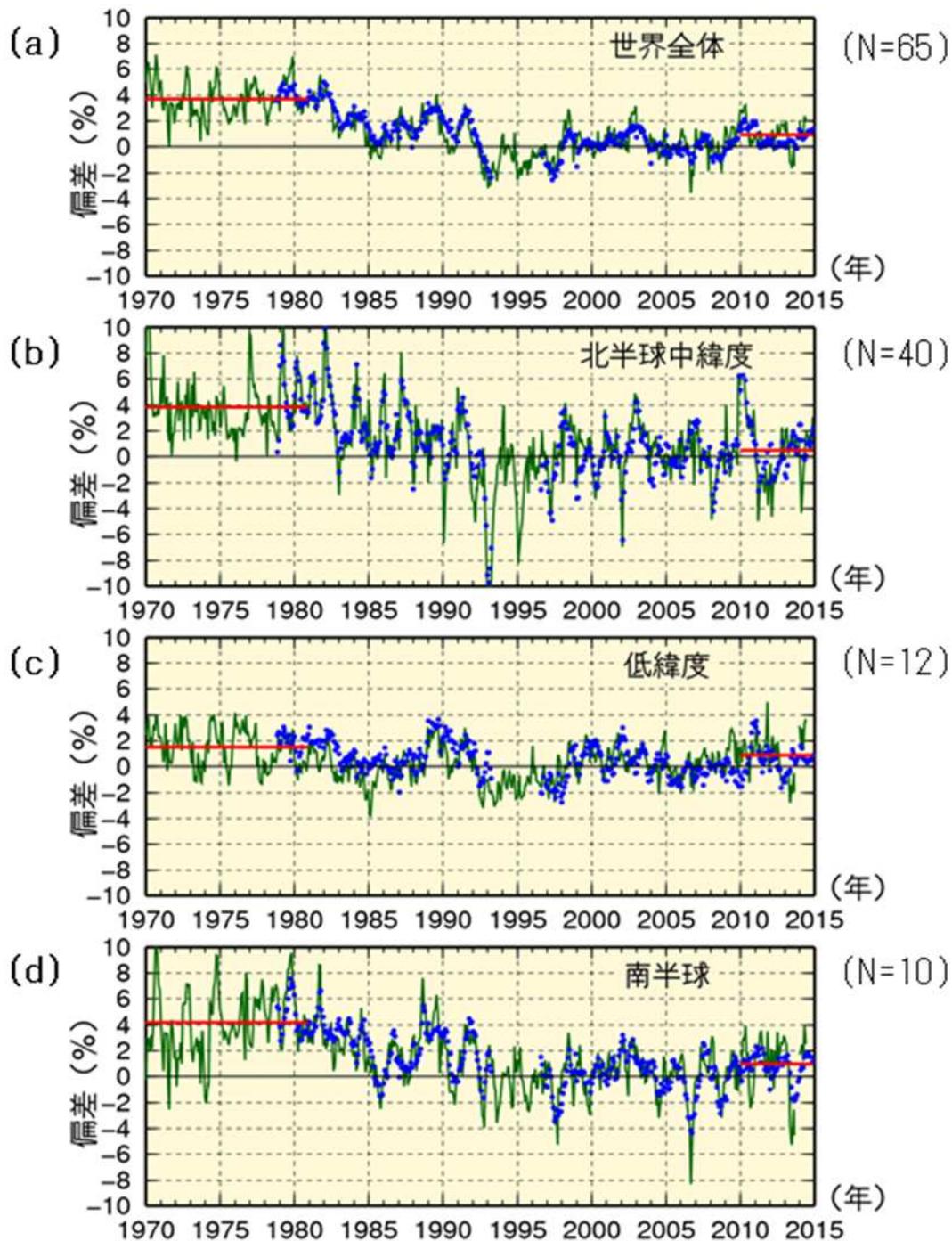


図2-1：世界のオゾン全量偏差(%)の長期変化

緑実線は世界の地上観測によるオゾン全量偏差(%), 青丸は衛星観測データによるオゾン全量偏差(%)で、季節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(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。赤実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。(a)世界全体(衛星データは北緯70度~南緯70度の平均)、(b)北半球中緯度(北緯30~60度平均)、(c)低緯度(北緯30度~南緯30度平均)、(d)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。世界の地上観測地点は世界オゾン・紫外線資料センター(WOUDC)のデータを用いており、各領域で使用した地点数は各図の右上のカッコ内に示した。衛星データはNASA提供のデータを用いた。

## オゾン全量の緯度帯毎の長期変化傾向

衛星観測による緯度帯ごとの1979～1996年の変化傾向を図2-2a、2000～2014年のデータの変化傾向を図2-2bに示す。地上観測の各地点の変化傾向も示す。1979～1996年の変化傾向では、低緯度帯の一部（北緯20度～南緯10度）を除き、有意な減少傾向がみられ、地上観測も概ね同様の傾向を示している。南半球では特に高緯度で減少傾向が大きい。これは南極オゾンホールへ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、1979～1996年の減少傾向と同じく南極オゾンホールへの影響を受けている可能性がある。

2000年以降の世界全体のオゾン全量の増加傾向には、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の変化が小さいため、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）。

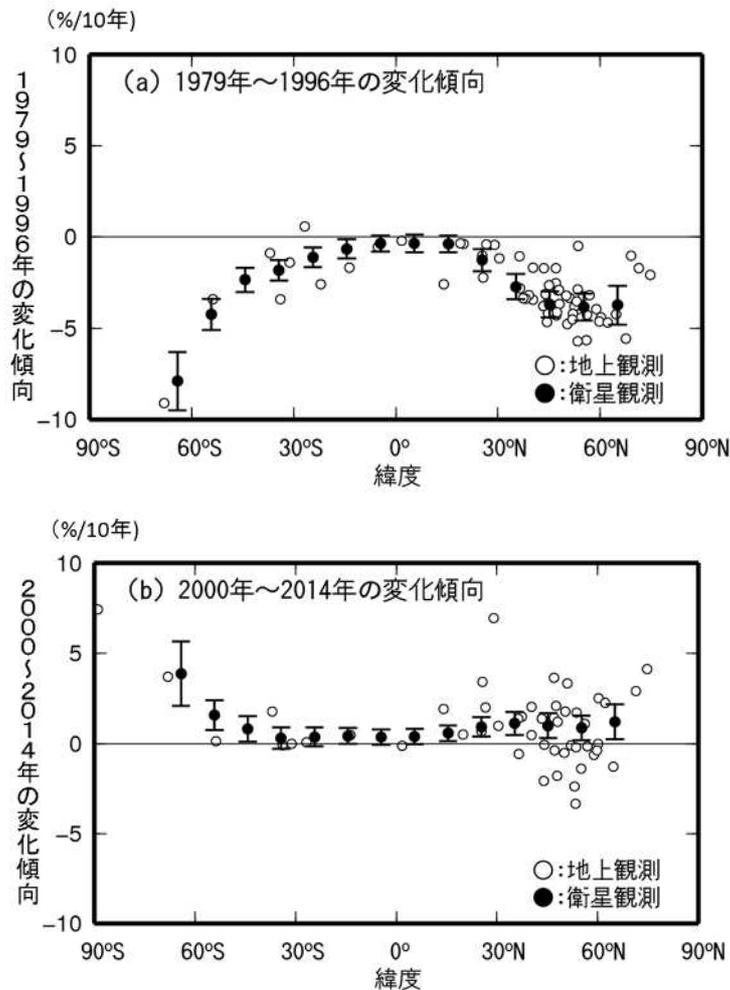


図2-2：オゾン全量の長期変化傾向の緯度帯別分布

(a) 1979～1996年の変化傾向（%/10年）と、(b) 2000～2014年の変化傾向（%/10年）。

衛星観測データは緯度帯（10度）ごとにプロットしている。衛星観測データの縦線は95%信頼区間の範囲。世界の観測地点のオゾン全量データ（最近4年間（2011～2014年）に観測データのない地点を除く56地点）およびNASA提供の衛星観測データから作成。

緯度帯別の長期変化傾向の季節変化を示すため、図2-3に、(a)1979～1996年、(b)2000～2014年の変化傾向(%)を緯度ごとに月別に示した。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。

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は10年あたり2%以上の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、オゾンホールが現れる場所が移り変わることに伴う年変動が大きいことが影響していると思われる。

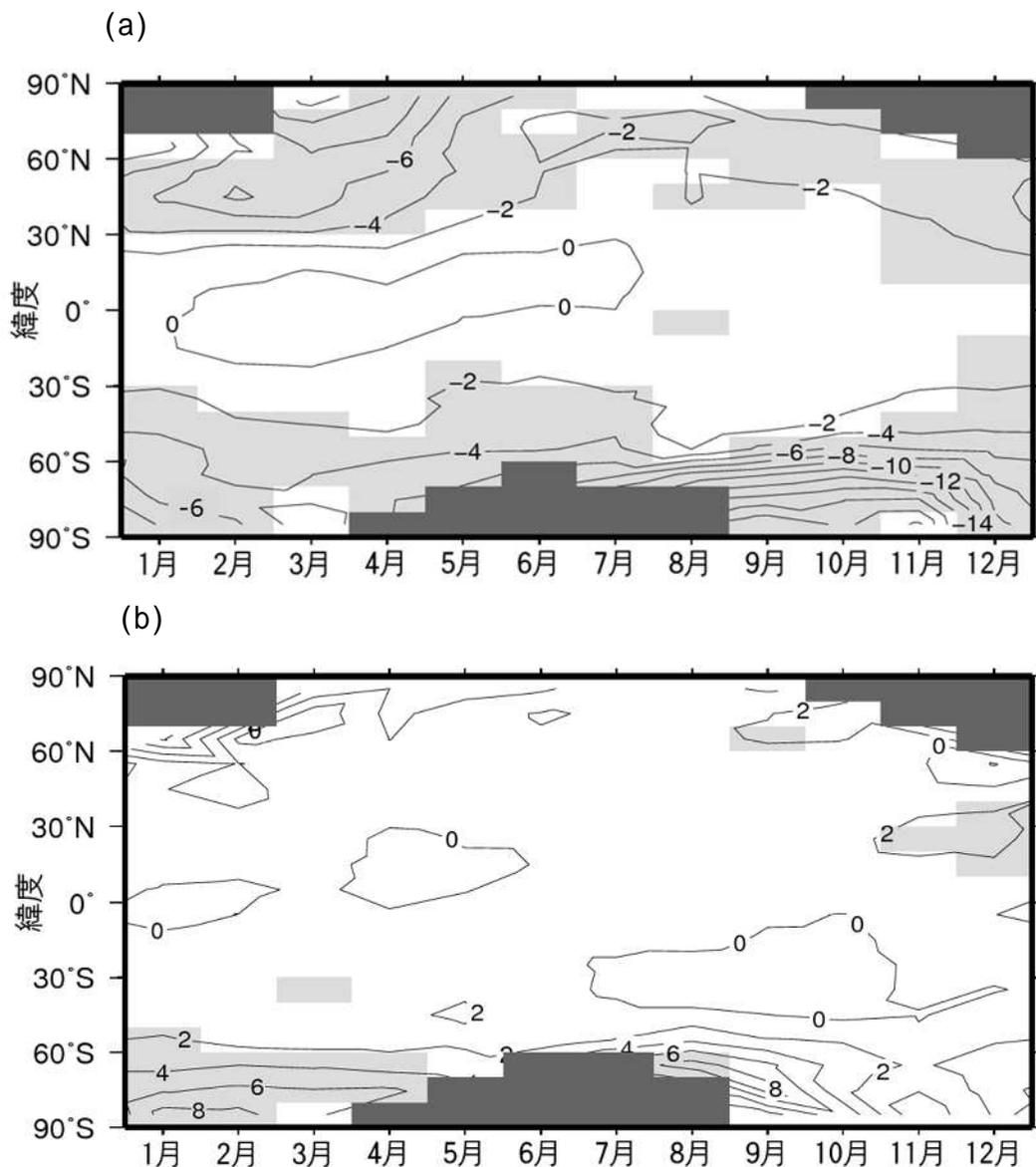


図2-3：帯状平均したオゾン全量の緯度帯別長期変化傾向の季節変化

(a) 1979～1996年と(b) 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。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。

## 2-2 南極オゾンホール長期変化

### 衛星観測データからみたオゾンホールの経年変化

南極オゾンホールの年最大面積とオゾン欠損量の年最大値、および年最低オゾン全量の経年変化を図2-4に示す。これによると、南極オゾンホールの規模は1980年代から1990年代半ばにかけて急激に拡大した。1990年代半ば以降は、年々変動はあるものの、長期的な拡大傾向はみられなくなった。しかし、南極オゾンホールの規模は依然として大きい状態が続いている。

次に、オゾンホールの規模を年ごとの最盛期だけではなく、その年のオゾンホール出現期間全体で評価する指標として、オゾンホール面積年積算値を定義し、その経年変化を図2-5aに示す。図2-4aの年最大面積では2014年は2013年と同じだったが、面積年積算値では2014年は2013年より大きく、また11月のオゾンホール面積の平均値も2013年に比べて2014年の方が大きいことから、2014年のオゾンホールが2013年に比べて面積が大きい時期が多く継続期間も長かったことに対応している。この指標でも、年ごとのオゾンホールの規模は依然として大きな状態であることがわかる。

南極オゾンホールは11～12月に消滅することが多い。そこで、オゾンホールの縮小ペースの年ごとの遅速の目安となる指標として、11月に観測された220 m atm-cm以下（オゾンホールの目安となるオゾン全量）の領域面積の平均値の経年変化を図2-5bに示す。11月平均値は年々変動が大きいものの、1986年以降急速に拡大し、近年も2006～2011年は比較的大きかった。

南極オゾンホールの規模には、オゾン層破壊物質の濃度の変化にともなう長期的な変化に加えて年々変動がみられ、2000年以降は年々変動が大きい傾向がある。このような年々変動は南極域上空の成層圏の極渦の強さや下部成層圏の気温などの大気の変動に対応している。2002年の事例では、その年の9月に発生した成層圏突然昇温によって成層圏気温が過去50年で最高となり、これに対応してオゾンホールの規模は近年としては特に小さくなった。

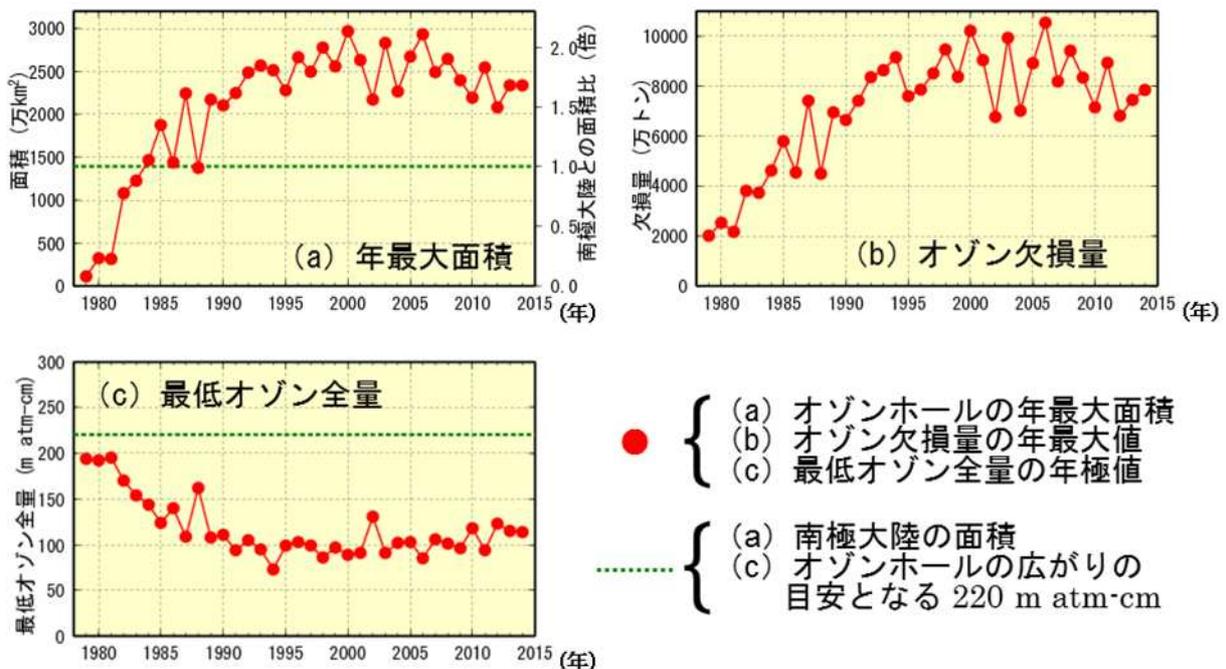


図2-4：オゾンホールの規模の経年変化

NASA 提供の衛星データをもとに作成（主に TOMS/OMI データを使用。1995 年のみ TOVS の高分解能赤外放射計のデータを使用）。



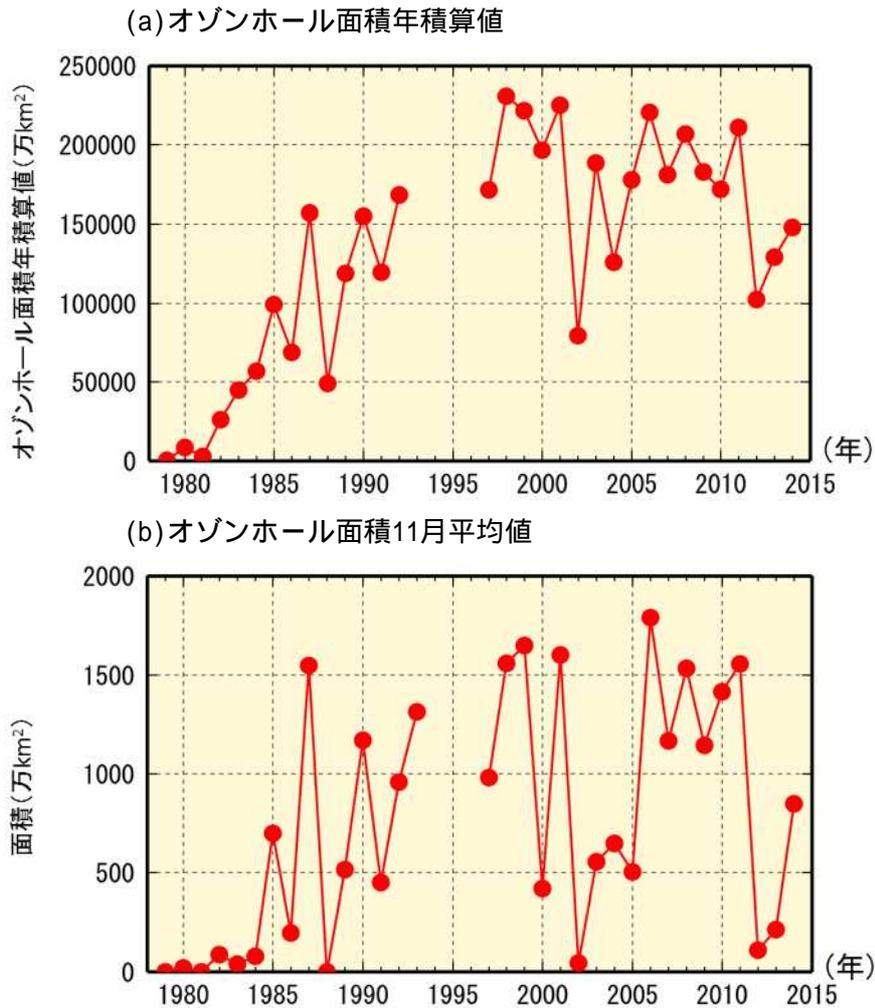


図2-5：オゾンホールの規模と縮小ペースの経年変化

1979～2014年の220 m atm-cm以下の領域面積の(a)年積算値と(b)11月平均値の経年変化。NASA提供の衛星データをもとに作成。年積算値の1993～1996年と11月平均値の1994～1996年についてはデータが十分得られていないため、面積を求めていない。

### 南極昭和基地上空のオゾン量の経年変化

南極昭和基地における9～12月の月平均オゾン全量の経年変化を図2-6に示す。各月とも1980年頃から減少し、1990年代半ば以降は少ない状態が継続している。9～11月の時系列において、2002年にオゾン全量が急増しているのは、前述のように成層圏の気温が特に高かったことによる。2009年の11月にオゾン全量が多いのは、大気の変動によってオゾンホールが偏って、昭和基地がオゾンホールの外に位置することが多かったためである。

図2-7に、昭和基地のオゾンゾンデ観測による10月の高度12～20 kmの層内における月平均オゾン量の経年変化を示す。この高度のオゾン量は、南極オゾンホールの発達に伴って大きく減少するため、南極オゾンホールの長期的な変化傾向についての指標になる。この高度のオゾン量は、1980年代から1990年代半ばにかけてに急激に減少した後、近年においても1970年代と比較して半分以下の状態が続いている。1992年の極小はピナトゥボ火山噴火(1991年6月)に起因してオゾン破壊が促進されたためと考えられ、2002年にオゾン全量が大きかったのは前述したように南極域で成層圏突然昇温が発生したためと考えられる。

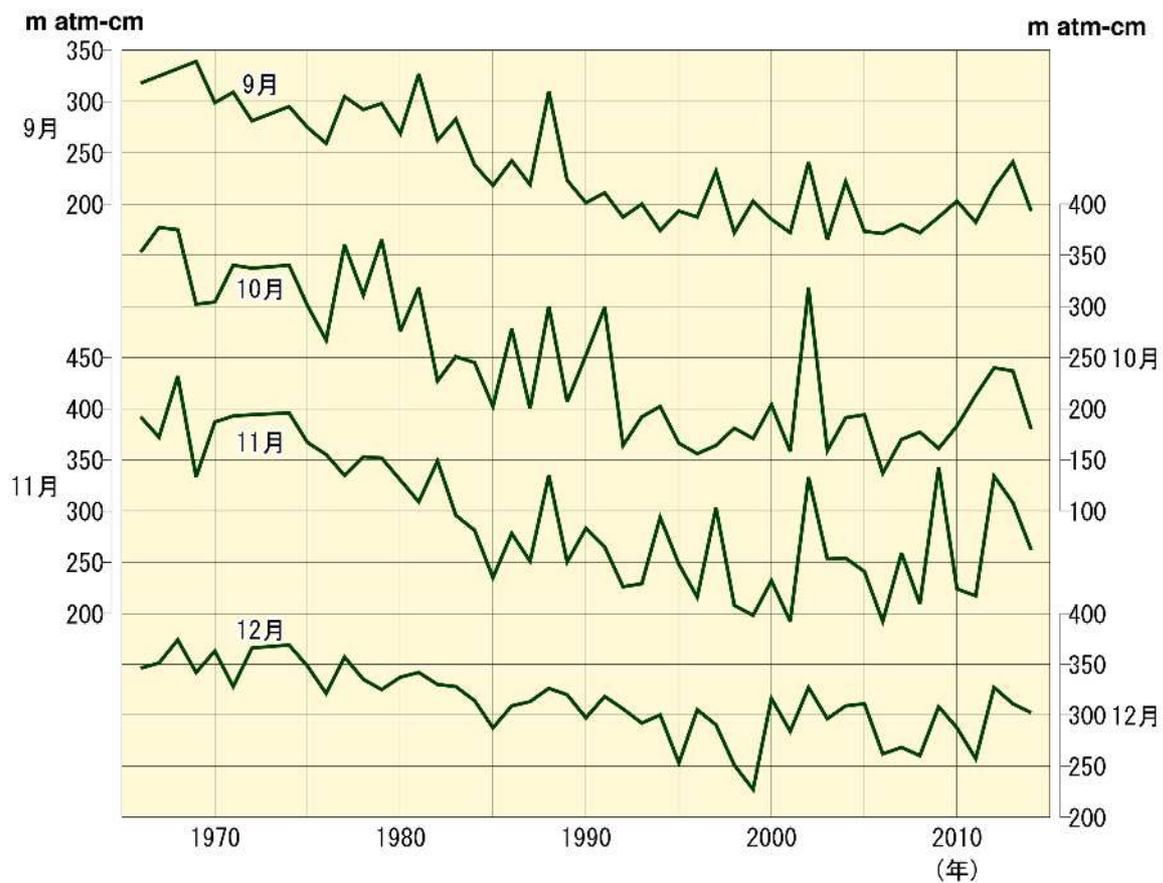


図2-6：南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化（9～12月）

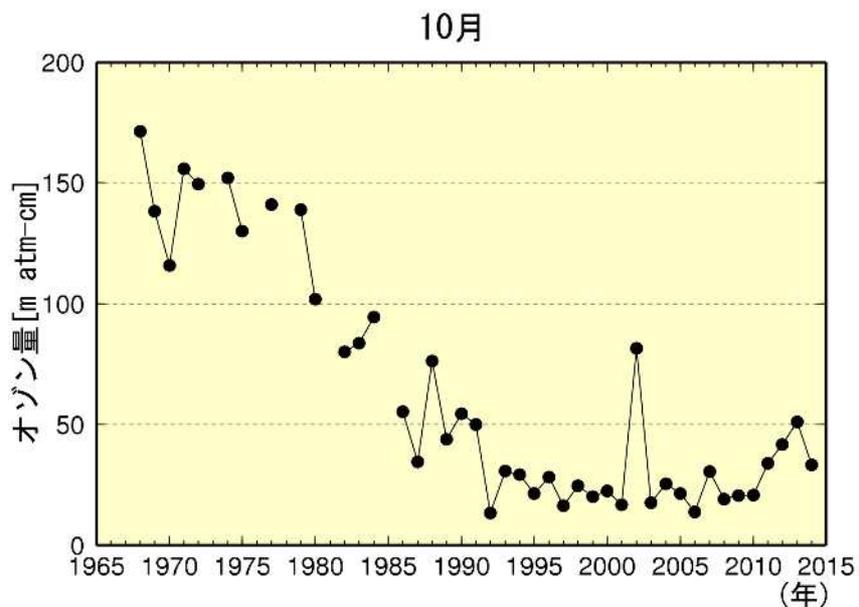


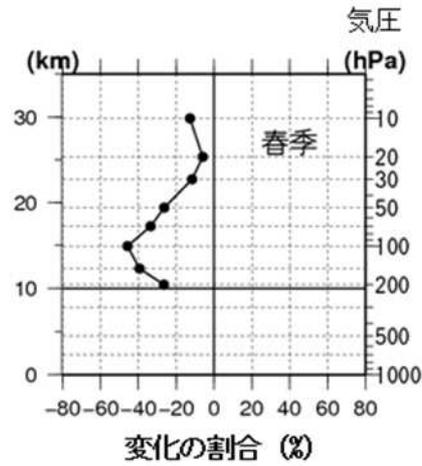
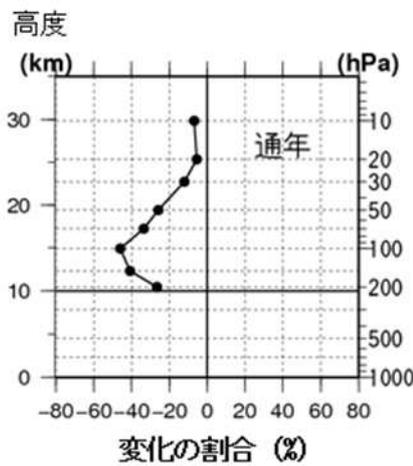
図2-7：南極昭基地上空（高度12～20km）の10月の月平均オゾン量の経年変化

### 南極昭和基地上空のオゾンの長期変化傾向

南極昭和基地上空のオゾンの鉛直分布の長期変化傾向を示すため、1970～1980年平均と最近5年平均の差(%)の高度分布を図2-8a、bに示す。これは、オゾンゾンデ観測による高度別オゾン分圧について、1970～1980年平均(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)と最近5年(2010～2014年)平均の差である。これをみると、通年、春季ともに高度10～30 km付近の全ての高度で1970～1980年平均よりも最近5年平均のほうが低く、特に高度10～18 km付近で顕著である。

2000年以降の変化傾向を図2-8c、dに示す。通年では高度10～18 km付近で、春季では高度13～18 km付近で有意な増加傾向がみられ、特に春季に明瞭だが、それ以外の高度では有意な傾向はみられなかった。このように、昭和基地上空のオゾンは、2000年以降一部高度で有意な増加傾向もみられるが、オゾン層破壊が起こる前と比べれば、依然として広い高度範囲でオゾン分圧の低い状態が続いているといえる。

(a) 1970～1980年平均と最近5年平均の差(%)      (b) 1970～1980年平均と最近5年平均の差(%)



(c) 2000年以降の変化傾向

(d) 2000年以降の変化傾向

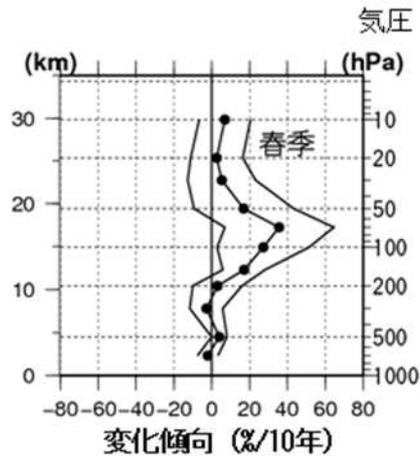
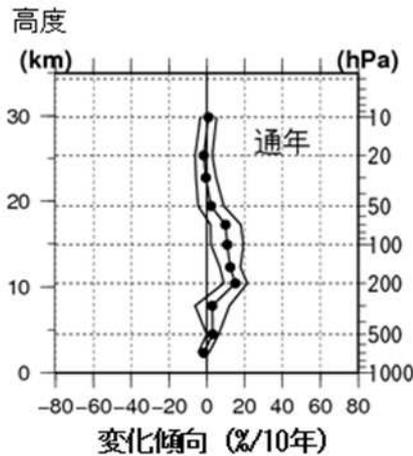


図2-8：南極昭和基地におけるオゾン分圧の長期変化傾向の高度分布

オゾンゾンデ観測から求めた高度別オゾン分圧の長期変化傾向。上段(a)(b)は成層圏におけるオゾン分圧の1970～1980年平均と最近5年間(2010～2014年)の平均との差(%)で、月別平均値から季節変動成分のみ除去したデータから求めた。下段(c)(d)は2000年以降の変化傾向(%/10年)で、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求めた(付録2参照)。横軸は変化量、縦軸は高度。下段(c)(d)の外側の折線は95%信頼区間。左(a)(c)は、通年で月別値(1～12月)から、右(b)(d)は春季で、月別値(9～11月)の値から求めた。

## 2-3 北半球高緯度のオゾン層の長期変化

北半球高緯度のオゾン全量の春季における経年変化をみるために、衛星観測 (TOMSおよびOMI) データから求めた北緯60度以北の3月の月平均オゾン全量の偏差およびイギリスのラーウィック (Lerwick: 北緯60度、西経1度) での地上観測による3月の月平均オゾン全量偏差を、図2-9に示す。ここでは比較の基準として、オゾン全量が北半球高緯度で相対的に多い1979~1989年の累年平均値を選んだ。

衛星データによると、1990年以降、データの無い1995年と1996年を除き、-20 m atm-cmを超える負偏差が23年のうち18回現れており、北半球高緯度でのオゾン全量が1990年以前に比べ少なくなる年が多い<sup>3</sup>。最近では、2011年のオゾン全量は1997年について2番目に少なかった。ラーウィックの地上観測でも衛星データと同様の傾向が見られる。2014年は、極域成層圏雲に関連したオゾン層破壊が起きた可能性があり、衛星データとラーウィックの地上観測値はともに-40 m atm-cm程度の負偏差となった。

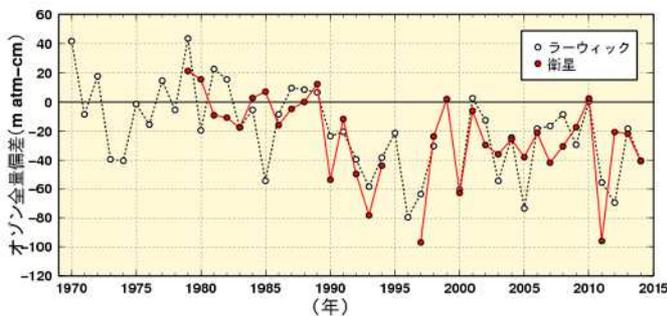


図2-9：北半球高緯度の3月のオゾン全量偏差の経年変化

はNASA提供の衛星観測 (TOMSおよびOMI) データをもとに気象庁で作成した北半球高緯度 (北緯60度以北) の3月の平均オゾン全量 (基準値は1979~1989年の平均値) からの偏差。なお、1995、1996年はTOMSデータが欠測のため値がない。印は、ラーウィック (英国、北緯60度、西経1度) の3月の平均オゾン全量の1979~1989年の平均値からの偏差を示す。

冬季から春季の北半球高緯度のオゾン全量の変動の要因は、成層圏におけるオゾンの輸送と化学的破壊であり、図2-9に示した月平均オゾン全量の変動もこの両者による変動を反映している。オゾンの輸送の影響が相対的に少ない極渦内部における日別オゾン全量の領域平均<sup>4</sup>を近似的に化学的破壊の影響を示す指標と考え、その3月における最低値を年ごとに求めた (図2-10)<sup>5</sup>。この指標も1990年以降は図2-9と同様の変動をしていて、北半球高緯度のオゾン全量の変動に化学的破壊が大きく寄与していると推定される。

等価実効成層圏塩素 (EESC、巻末「用語解説」を参照) はオゾン層破壊物質の濃度の指標として使われているが、極域上空の成層圏におけるEESCは、2000年頃を境に緩やかに減少しているものの、依然として高い状況が継続している。よって、この先数十年は気象状況により極渦が強く安定すれば、北半球でも2011年春のような大規模なオゾン層破壊が発生する可能性がある (WMO, 2014)。

<sup>3</sup> 1995と1996年にはTOMSデータがないが、SBUV/2のデータを用いた解析によると、両年ともに春季にオゾン全量の大規模な減少が観測されている (NOAA, 2005)。

<sup>4</sup> 極渦に近い領域として、等価緯度63度以上を対象にして、オゾン全量の領域平均を計算している。「等価緯度」については、巻末の「用語解説」を参照のこと。

<sup>5</sup> この指標は、オゾンゾンデ観測や数値モデル計算を用いて厳密に計算した各年の化学的な破壊量と相関がよいと報告されている (Müller *et al.*, 2008)。

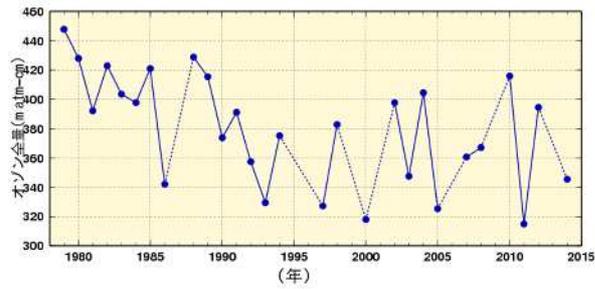


図2-10：北半球3月の極渦内（等価緯度北緯63度以北）で平均した日別オゾン全量の月最低値の経年変化

等価緯度（巻末「用語解説」参照）に相当する渦位およびその範囲はJRA-55による渦位の解析値（等温位面475 K（高度約19 km）上）から計算した。オゾン全量データはNASA提供の衛星観測データをもとに気象庁で作成した。1995、1996年はTOMSデータが欠測のため値がない。また、極渦が3月以前に消滅したと推定される年は描画していない。

## 2-4 日本上空のオゾン層の長期変化

### 日本上空のオゾン全量の経年変化

気象庁が観測を行っている札幌、つくば、那覇、南鳥島のオゾン全量の年平均値の経年変化を図2-11に示す。札幌とつくばのオゾン全量は、1980年代から1990年代半ばまで減少した後、緩やかな増加傾向がみられるが、札幌では最近の5年間の平均値はオゾン層破壊現象がまだ現れていないと見なしうる1970～1980年平均値と比べて少ない状況にあり、オゾン層破壊前のレベルには回復していない。一方、那覇と南鳥島では期間を通して緩やかな増加傾向が見られる。

なお、1993年を中心として札幌、つくば、那覇とも一時的にオゾンが少ないのは、1991年のピナトゥボ火山噴火に伴い増加した成層圏エアロゾルの影響でオゾンが破壊されたためと考えられる。

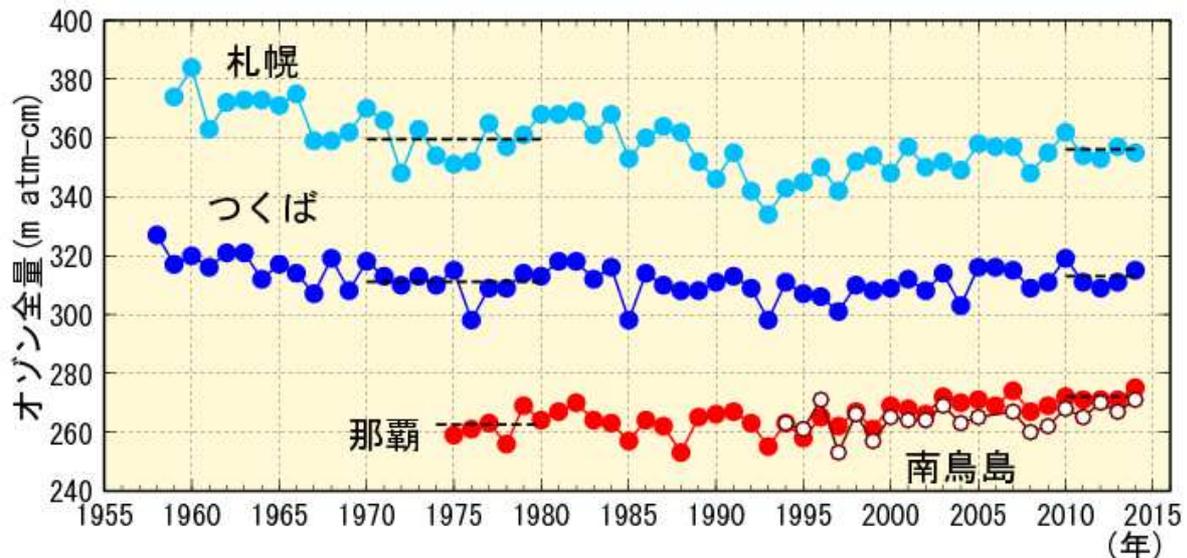


図2-11：日本上空のオゾン全量の年平均値の経年変化

札幌、つくば、那覇、南鳥島におけるオゾン全量の年平均値の経年変化。この図では、観測値をそのまま使用した（太陽活動など既知の周期的な自然要因と相関の高い変動成分は除去していない）。黒破線は1970～1980年平均値（那覇は1975～1980年）と最近5年間（2010～2014年）の平均値。

### 日本上空のオゾン全量の季節別経年変化

札幌、つくば、那覇、南鳥島のオゾン全量の季節平均値の経年変化を図2-12に示す。図2-12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時期の平均値として1970～1980年の平均値、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1994～2008年の平均値、また、近年の状態として最近5年間（2010～2014年）の平均値も示している。いずれも最近5年間の平均値は1994～2008年の平均値より増えているものの、札幌の春・秋・冬とつくばの冬ではオゾン層破壊前の時期の平均値までは回復していない。一方、那覇の全ての季節、つくばの冬以外と札幌の夏では、オゾン層破壊前の時期の平均値より最近5年間の平均値の方が高い。

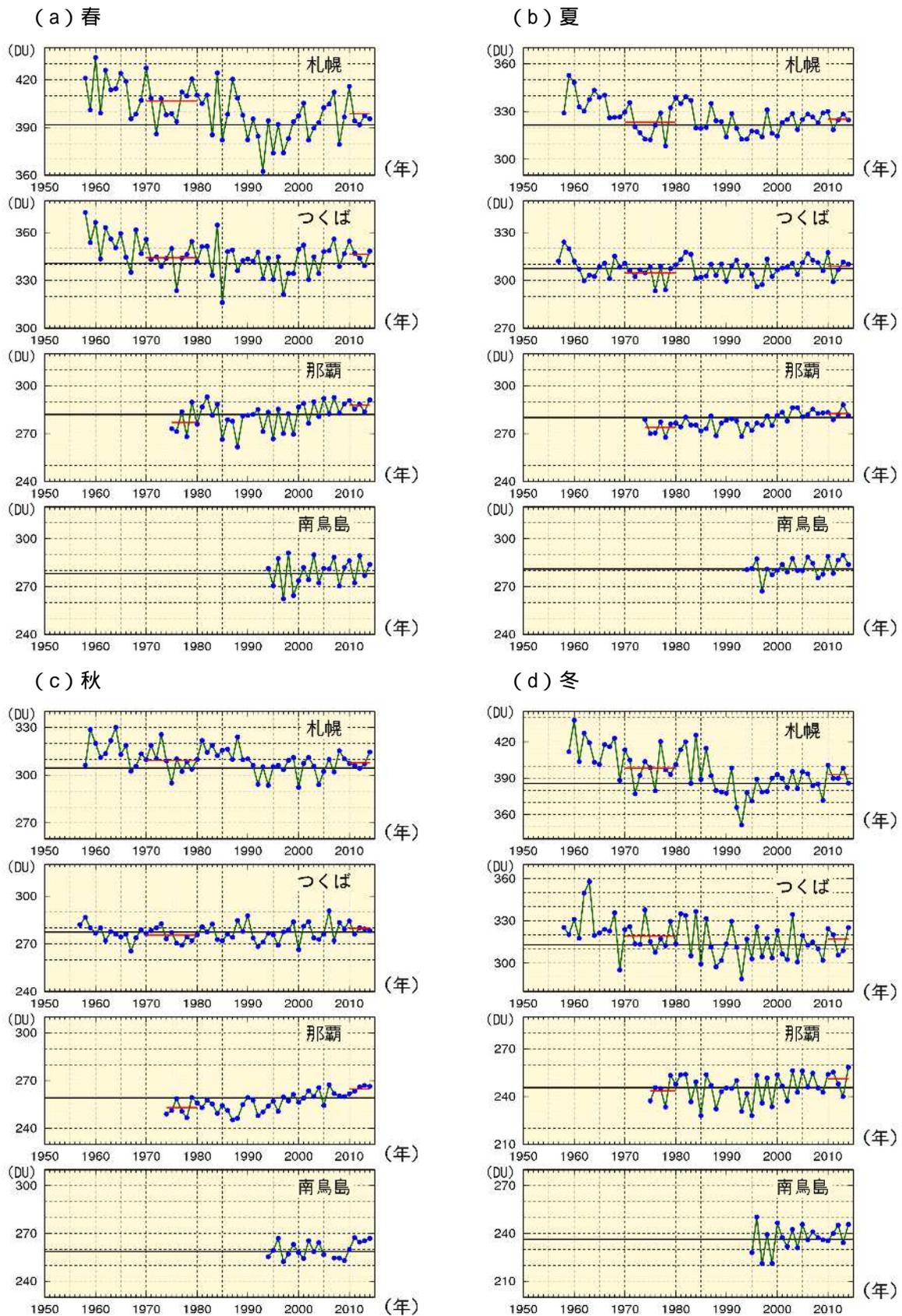


図2-12：日本上空のオゾン全量の季節平均値の経年変化

札幌、つくば、那覇、南鳥島におけるオゾン全量の季節平均値の経年変化。(a) 春(3~5月)、(b) 夏(6~8月)、(c) 秋(9~11月)、(d) 冬(前年12月~2月)についての値。3か月のうち1つでも月平均値に欠測がある場合は、季節平均値も欠測としている。黒線は1994~2008年の平均値、赤線は1970~1980年の平均値(那覇は1975~1980年もしくは1974~1980年)と最近5年間(2010~2014年)の平均値。

## 日本上空のオゾン全量の長期変化傾向

国内3地点の地上観測データを用いたオゾン全量（太陽活動など既知の周期的な自然要因と相関の高い変動成分を除去した値：黒線）と、オゾン層破壊が進んだとみられる1979～1996年までの期間と僅かな増加がみられる2000年以降の期間の長期的な変化傾向（赤線）を図2-13に示す（付録3参照）。各地点のオゾン全量の経年変化（黒線）をみると、1990年代半ばまでの減少に対し、2000年代半ば以降の増加がみられる。

国内3地点の1979～1996年のオゾン全量は減少傾向を示していた。特に、札幌とつくばでは有意に減少しており、札幌では10年当たり約4%、つくばでは10年当たり約1%の割合で減少した。

2000～2014年の変化傾向をみると、図2-2に示した緯度帯別の長期変化傾向と同様に増加傾向を示しており、札幌とつくばでは10年当たり約1%、那覇では10年当たり約2%の割合で有意な増加がみられた。

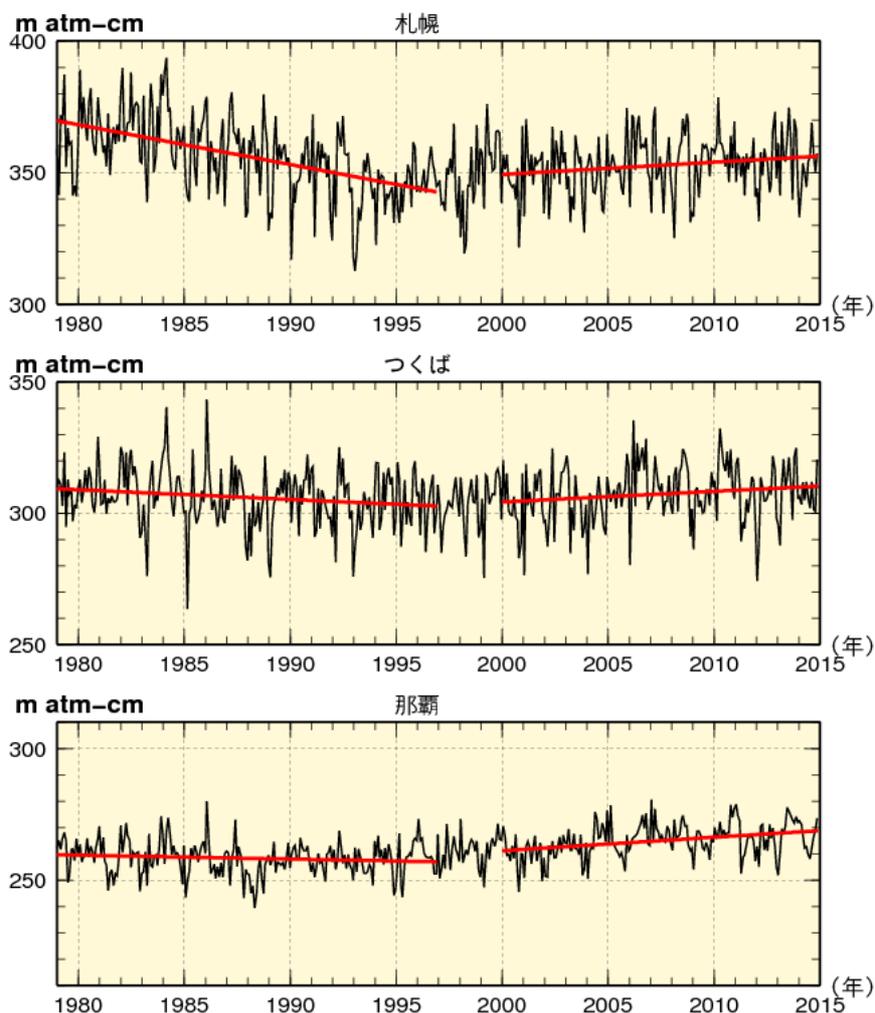


図2-13：日本上空のオゾン全量の長期変化傾向

国内のオゾン全量観測による1979年以降のオゾン全量(m atm-cm)。黒線は、太陽活動など既知の周期的な自然要因と相関の高い変動成分を除去した値である。赤線は、1979～1996年及び2000～2014年の回帰直線を示す。上から、札幌、つくば、那覇のデータ。

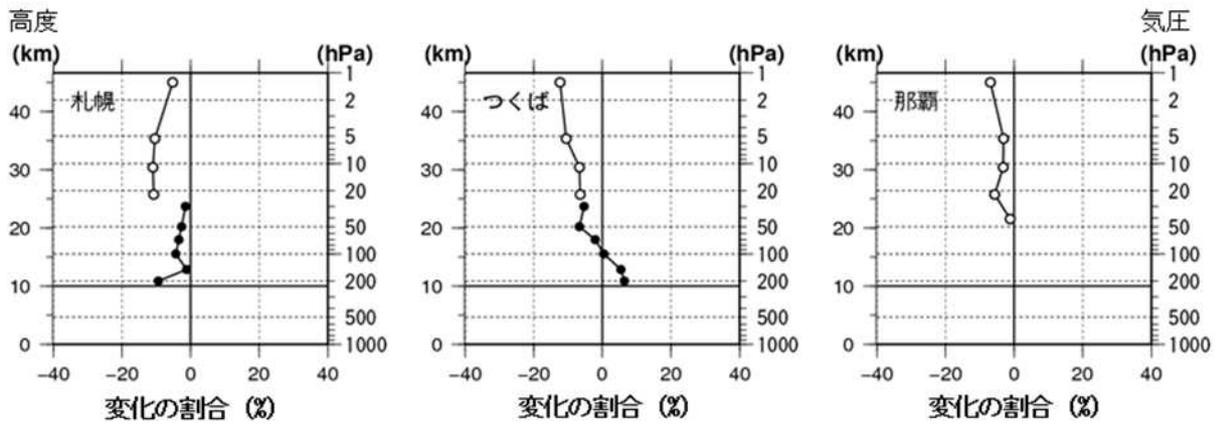


### 日本上空のオゾン鉛直分布の長期変化傾向

日本上空のオゾン鉛直分布の長期変化傾向をみるため、1970～1980年までの平均値（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）と最近5年間（2010～2014年）との差（％）について鉛直分布を図2-14aに示す。札幌ではほぼ全ての高度でオゾン層破壊前の平均値までは回復しておらず、つくばや那覇の上部成層圏でも同様である。

2000年以降の変化傾向（図2-14b）をみると、上部成層圏では、つくばは5 hPa（高度35 km）以上で有意な増加傾向がみられる。札幌と那覇でも増加傾向がみられたが、有意なものは札幌の高度約30～35 km付近のみであった。一方、対流圏から下部成層圏では、3地点とも有意な増加傾向がみられた。

(a) 1970～1980年の平均と最近5年間の平均との差（％）



(b) 2000年以降の変化傾向（%/10年）

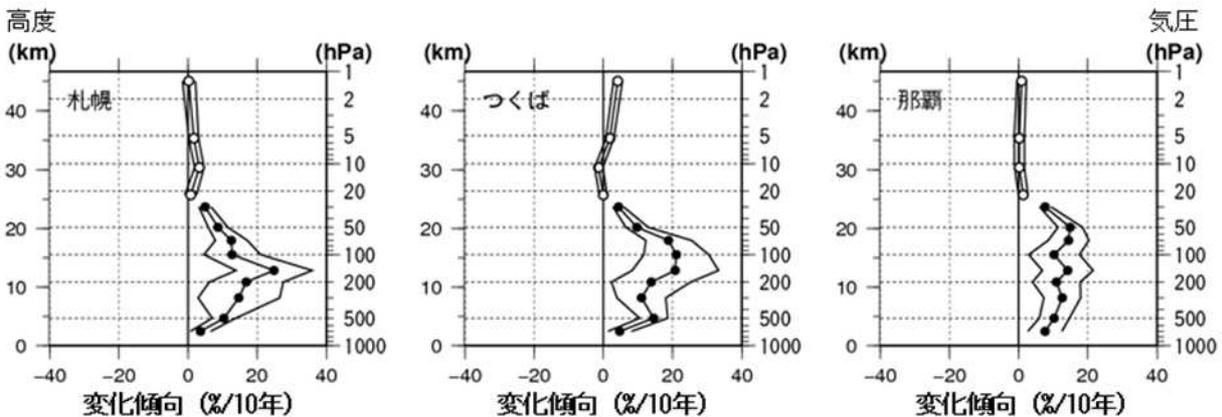


図2-14：日本上空のオゾン鉛直分布の長期変化傾向

(a) 1970～1980年平均のオゾン量と最近5年間（2010～2014年）平均との差（％）、(b) 2000年以降の変化傾向（%/10年）。

印はオゾンゾンデ観測データ、印は反転観測データによる。那覇は、1989年より前のオゾンゾンデ観測データがないため、(a)では反転観測の結果のみ示す。(a)は月別平均値から季節変動成分のみを除去し、(b)は季節変動および既知の自然変動による影響の成分を除去している（付録2参照）。また、外側の折線は95%信頼区間の範囲。なお、反転観測の約45 kmの印は、高度40 km付近より高い気層について合計した量について表している。

## 2-5 日本および南極域の紫外線の長期変化

### 紅斑紫外線量の年積算値の経年変化

観測開始（1990年代初め）以降の紅斑紫外線量年積算値の経年変化を図2-15に示す。国内3地点の紅斑紫外線量は、観測を開始した1990年代初め以降、札幌とつくばで増加しており、増加率はそれぞれ10年あたり4.3%、5.4%で統計的に有意である（信頼区間95%）。増加の特徴としては、札幌では、主に1990年代半ばから2000年代に増加している。那覇では、1990年代に増加した後、2000年代は変化傾向がみられない。つくばでは2011年以降、観測開始以来の第1位を含む高い値が続いている。

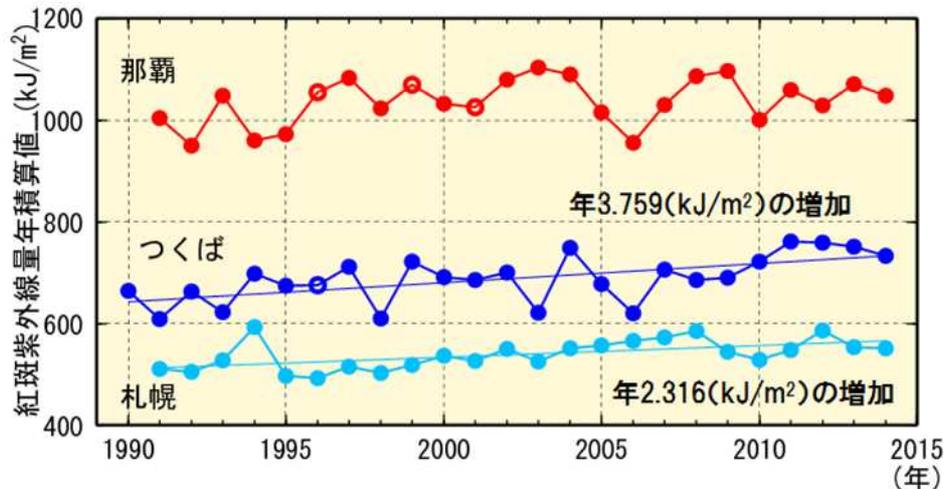


図2-15：紅斑紫外線量の年積算値の経年変化

札幌、つくば、那覇における紅斑紫外線量年積算値の経年変化。年積算値は欠測を考慮し、欠測を除いた紅斑紫外線量日積算値の月平均値を求め、その値に各月のカレンダー日数をかけ、12か月積算して算出している。印は紅斑紫外線量の年積算値を示すが、印となっている年は、年積算の計算に用いる月平均値の中に1か月の日別観測数が20日未満の月が含まれることを示す。統計的に有意（信頼度水準95%）に増加している札幌とつくばについて全期間の長期的な傾向を直線で示し、紅斑紫外線量の年積算値の増加率を図中に示した。

「オゾン破壊の環境影響アセスメント：2014」（UNEP, 2015）によれば、モントリオール議定書の成功の結果、オゾン層破壊が軽減され、多くの地域における1990年代半ば以降の紫外線の変化は、オゾンよりも他の要因の影響が大きくなっている。さらに北半球中緯度のいくつかの地点では、雲量とエアロゾルの減少により紫外線が増加していることが報告されている。国内のオゾン全量は1990年代半ば以降緩やかに増加していることから（2-4節参照）、国内の紅斑紫外線量の増加も、雲量とエアロゾルの減少が原因として考えられる。

### 日最大UVインデックス8以上の年積算日数の経年変化

環境省「紫外線環境保健マニュアル」では、UVインデックスが8以上の場合、日中の外出を控えるなど特に配慮が必要としている。このような特に強い紫外線の観測日数の変化傾向をみるために、国内3地点について日最大UVインデックスが8以上となった日の年積算日数を図2-16に示した。

平均的な年積算日数（観測開始～2014年で資料不足値の年も含めた平均値）は、札幌で13日、つくばで39日、那覇で139日である。緯度が南の地点ほど日数が多く、那覇は札幌の約11倍の日数になる。経年変化についてみると、国内3地点でいずれも観測を開始した1990年代初め以降に増加しており、増加率は10年あたり札幌で6日、つくばでは11日で、那覇では9日とそれぞれ統計的に有意である（信頼区間95%）。日最大UVインデックス8以上の年積算日数の増加傾向の要因は、紅

斑紫外線量年積算値と同様、雲量とエアロゾルの減少が原因として考えられる。

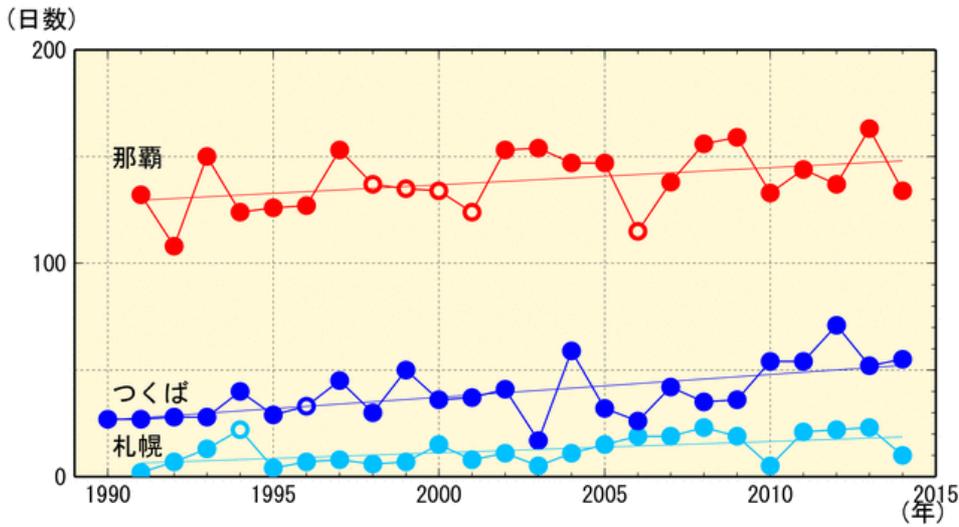


図2-16：日最大UVインデックスが8以上の年積算日数の経年変化

印は、日最大 UV インデックスが 8 以上の年積算日数。日最大 UV インデックスがその月の 20%以上欠測となった月が一つ以上あれば、その年の年積算日数を資料不足値とした(図中の 印)。ただし、過去に日最大 UV インデックス 8 以上が観測されていない月(札幌は 1~4 月、10~12 月、つくばは 1~3 月、10~12 月、那覇は 1 月、12 月)は積算の対象としない。

雲は一般に太陽光を遮るが、状況によっては散乱効果により紫外線を増加させる場合もある。太陽に雲がかかっておらず、かつ太陽の近くに積雲が点在しているような場合には、散乱成分が多くなるので、快晴時に比べて25%を超える紫外線の増加が観測されることがある (Estupinan *et al.*, 1996)。これまでに国内で観測された紅斑紫外線量の特別値が最大になった事例(表2-1)は、いずれも全天の80%以上が雲に覆われている状態であった。

表2-1：国内および南極昭和基地の紅斑紫外線量の極値

札幌、那覇は 1991~2014 年、つくばは 1990~2014 年、鹿児島は 1991~2005 年 3 月、南極昭和基地は 1993~2014 年。

| 項目                                | 観測地点          |              |               |              |                |
|-----------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|----------------|
|                                   | 札幌            | つくば          | 鹿児島           | 那覇           | 南極昭和基地         |
| 紅斑紫外線量特別値(mW/m <sup>2</sup> )     | 244           | 276          | 327           | 349          | 300            |
| UVインデックス                          | 9.8           | 11.1         | 13.1          | 14.0         | 12.0           |
| 観測日時                              | 1997.7.27 12h | 2009.8.1 11h | 1996.6.28 13h | 1996.8.5 13h | 2006.11.23 12h |
| 日積算紅斑紫外線量(kJ/m <sup>2</sup> )     | 5.55          | 5.90         | 7.09          | 6.63         | 8.66           |
| 観測日                               | 2013.6.13     | 2011.7.17    | 1996.6.28     | 2014.7.6     | 2006.11.23     |
| 日積算紅斑紫外線量月平均値(kJ/m <sup>2</sup> ) | 3.55          | 4.09         | 4.66          | 5.25         | 6.97           |
| 観測月                               | 2007.7        | 2004.7       | 2004.8        | 2014.7       | 1999.12        |

### 南極域における紫外線の長期変化

南極昭和基地では極夜があるため、気象庁では紅斑紫外線量日積算値の年平均値を算出していない。そのため、年平均値の代わりに紅斑紫外線量の多い時期である11～1月の3か月平均紅斑紫外線量日積算値の経年変化を示す(図2-17)。この時期の紅斑紫外線量日積算値は南極オゾンホール  
の規模や消滅時期に大きく左右されているため、大きく変動しているが、長期変化として、統計的に有意な増減はみられない。

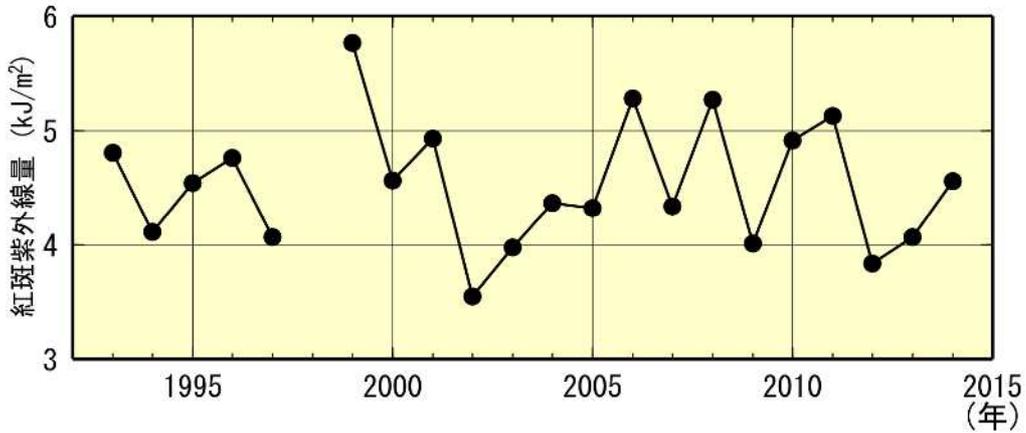
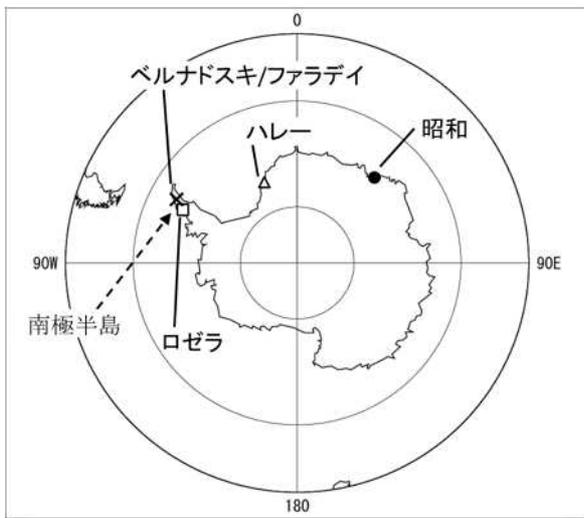
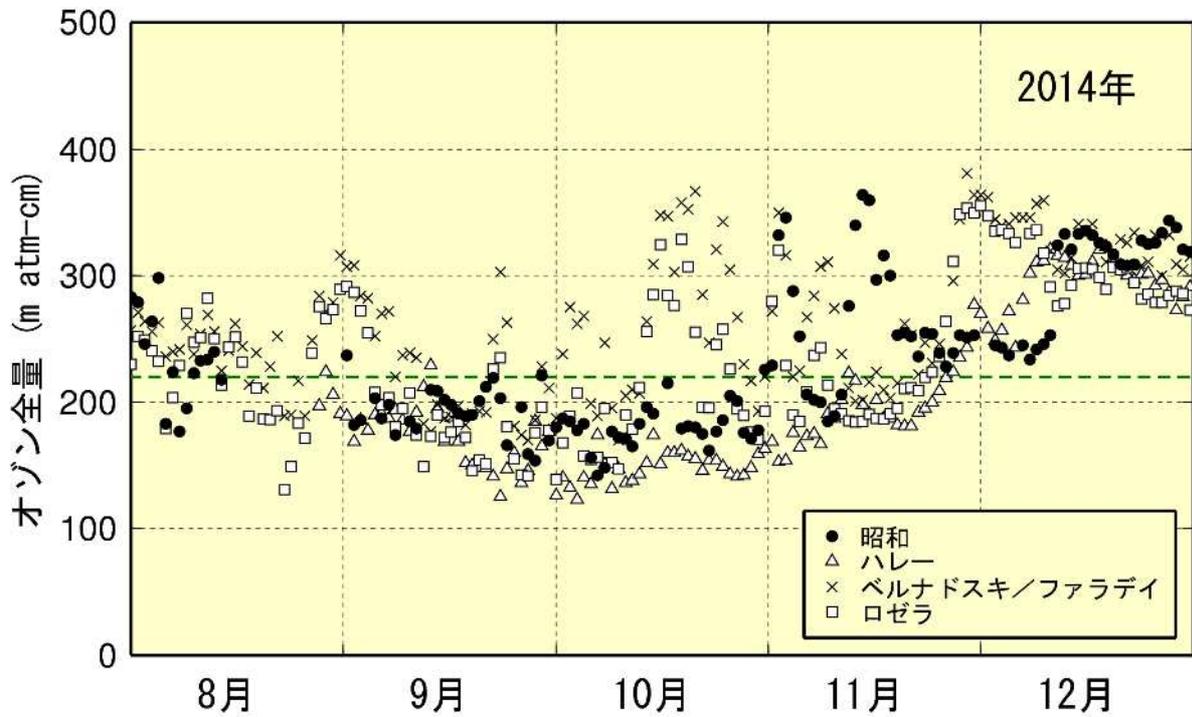


図 2-17: 1993 年から 2014 年までの南極昭和基地における 11～1 月平均紅斑紫外線量日積算値の経年変化

南極昭和基地で紅斑紫外線量の多い時期である 11～1 月の 3 か月平均した紅斑紫外線量日積算値。2014 年のデータは 2014 年 11 月から 2015 年 1 月の 3 か月平均値。

# 資料

## 資料1 南極各国基地におけるオゾン全量 (2014年)



図S-1：南極各国基地におけるオゾン全量 (2014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2014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

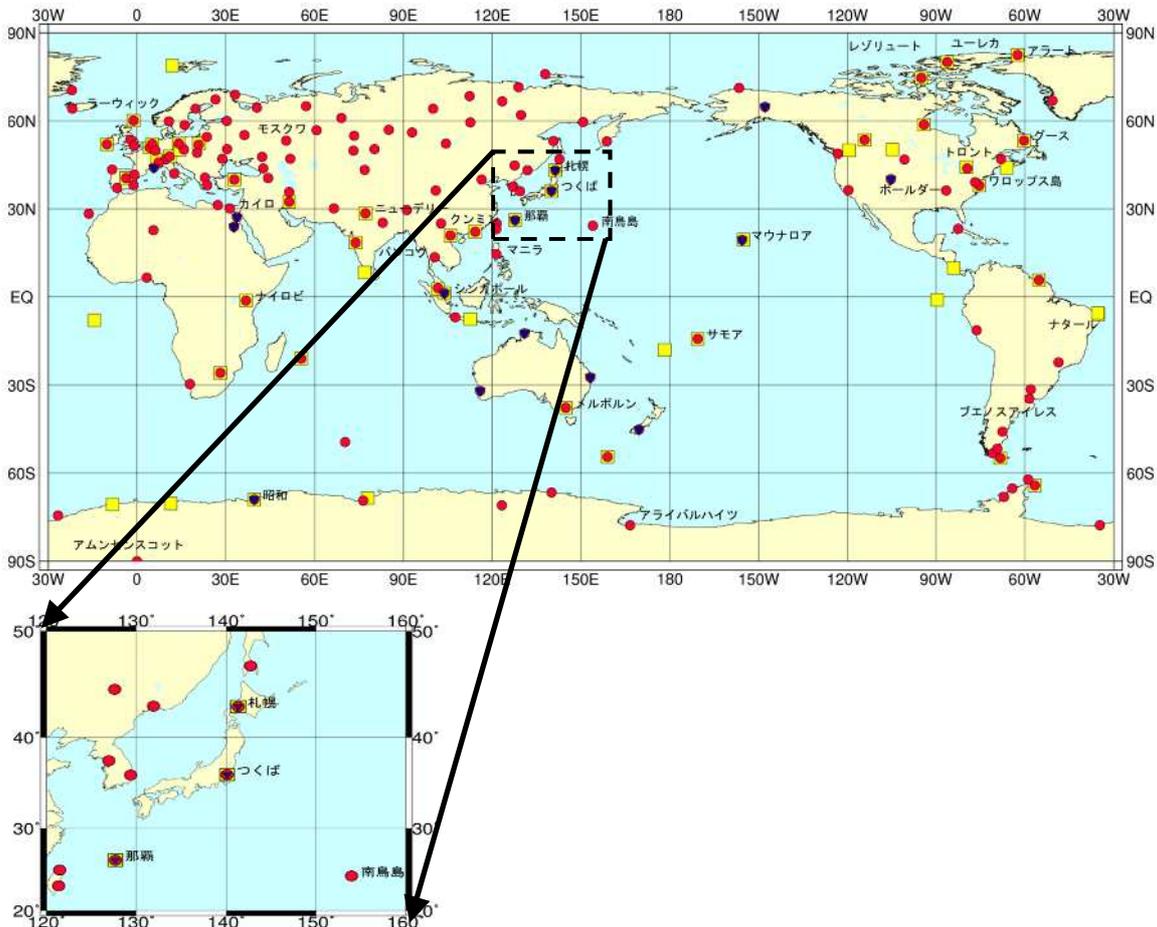
## 付録1 解析に使用した観測資料

### 付録1-1 地上観測データ(オゾン)<sup>6</sup>

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2014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。2010年から2014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。

#### オゾン全量観測データおよび反転観測データ：

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およびオゾン高度分布観測(反転観測)の開始は、1957年つくば、1958年札幌および鹿児島、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2014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。



図A1-1：オゾン観測地点の分布(2010-2014年)

【上図】全量観測は150地点(印)、反転観測は15地点(印)、オゾンゾンデ観測は55地点(印)

【左図】日本周辺域の拡大図。

<sup>6</sup> 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](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年の累年平均値で使用される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）<sup>7</sup>

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月で終了した）。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以上の年積算日数の経年変化」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%

<sup>7</sup> 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](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、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、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およ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および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

米国航空宇宙局（NASA；National Aeronautics and Space Administration）  
米国海洋大気庁（NOAA；National Oceanic and Atmospheric Administration）

| 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 -<br>1993.4 | 1993.5 -<br>1994.11 | 1996.7 -<br>2004.12 | 2005.1 - | 1995    | 1995    |

#### 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およ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。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ため、長期変化傾向の計算から除外している。

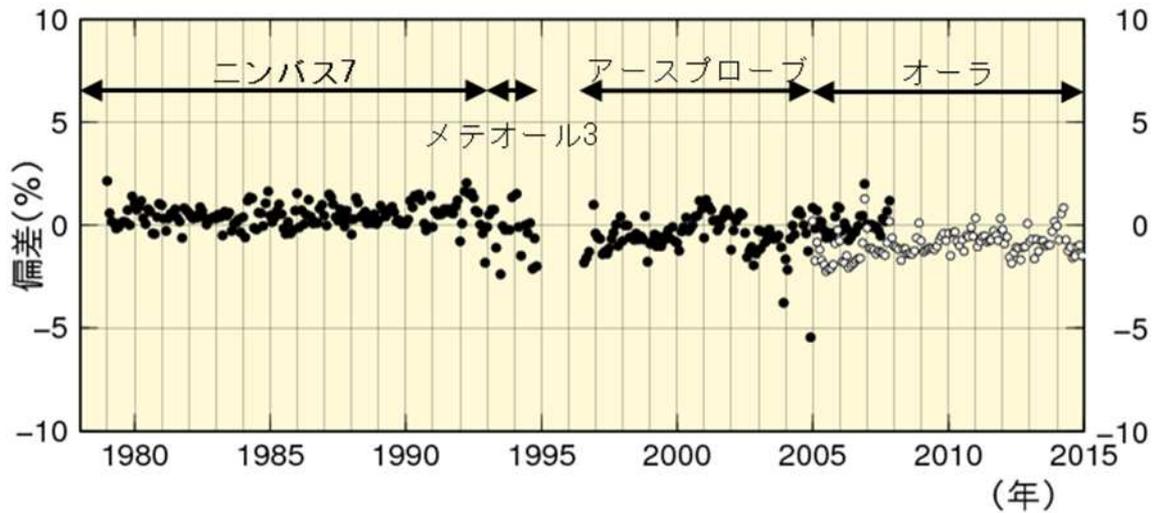


図 A1-2：衛星データと地上観測データの比較

北半球中緯度帯(北緯 30 度 - 60 度)の TOMS および 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

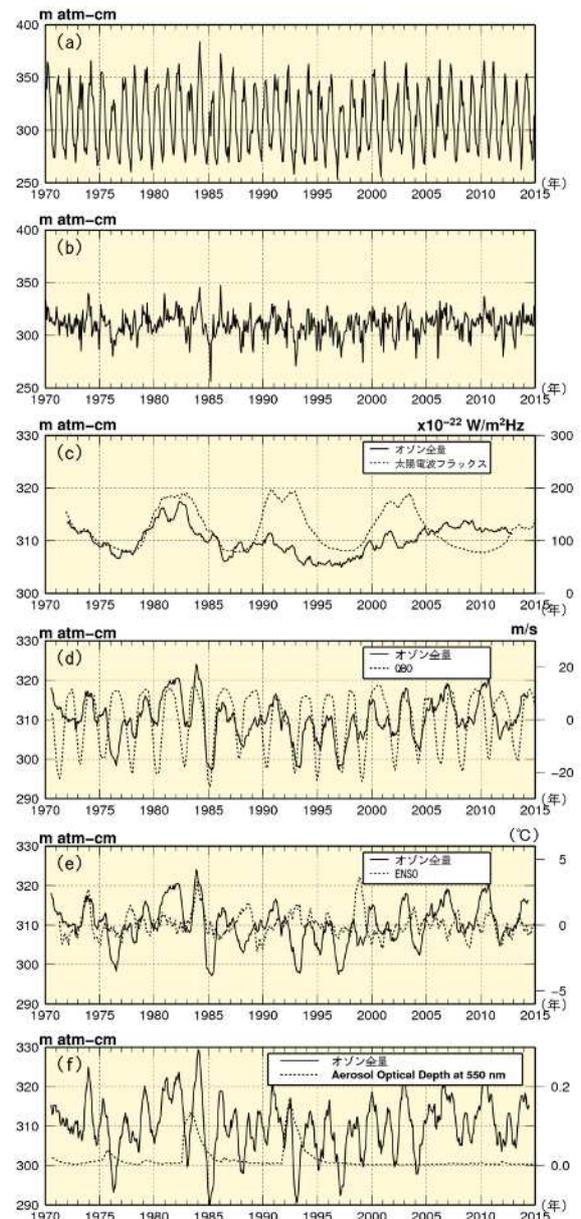
オゾン全量はさまざまな要因によって変動する。一例として、図A2-1aにつくばにおける1970年から2014年までのオゾン全量月平均値の推移を示す。月平均値の推移には明瞭な季節変動がみられ、年平均値の20～30%程度の振幅をもっている。この時系列から季節変動成分を取り除いたオゾン全量の変化を図A2-1bに示す。この経年変化には、2～3年や10年程度のほぼ周期的な変動成分が含まれており、オゾンの長期変化傾向（トレンド）を正確に求めるには、季節変動に加え、これらの変動成分をオゾンの時系列データから除去する必要がある（吉松ほか、2005）。

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A2-1c）、約2年周期のQBO（図A2-1d）、ENSO（エルニーニョ/ラニーニャ現象）（図A2-1e）、大きな火山噴火等で生じる成層圏エアロゾル（図A2-1f）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、および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A2-1b）。
- 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

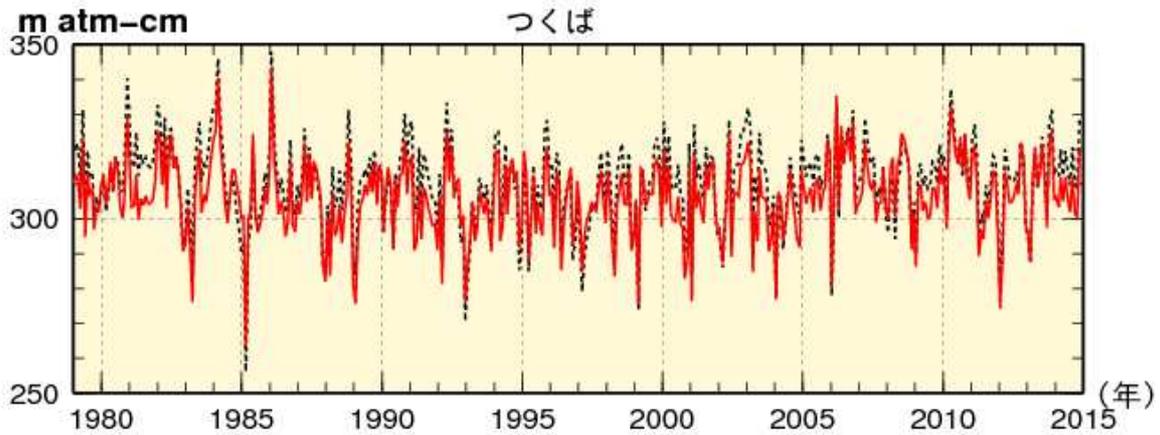


図A2-1：つくばにおけるオゾン全量の変化と各自然変動要因との関係

(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）

ーニヨ監視指数、Aerosol Optical Thicknessデータ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（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A2-1c、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<sup>8</sup>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およ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）

<sup>8</sup> 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つ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

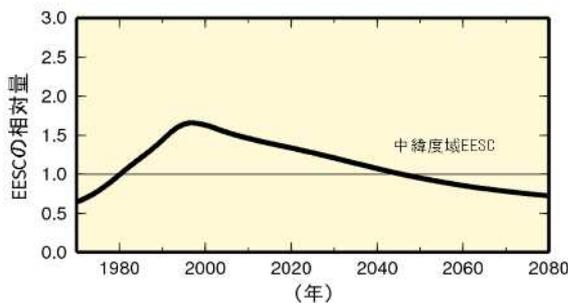
#### オゾン減少期と近年の長期変化傾向の評価

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)。

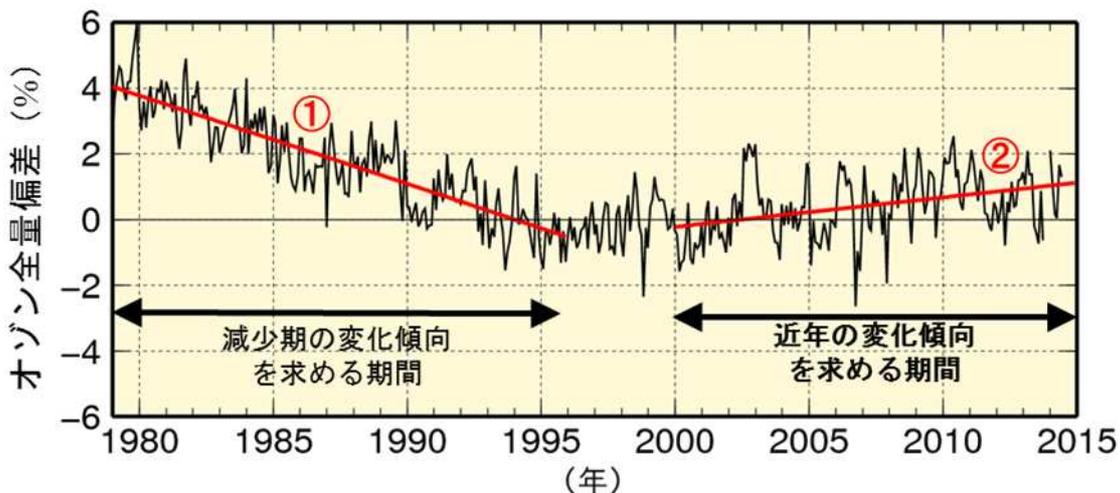
#### 観測データの選別について

長期変化傾向の抽出で使用する地上観測地点は、毎月/month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の数値は米国航空宇宙局(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。黒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2000~2014年の回帰直線( )。世界の地上観測地点は世界オゾン・紫外線資料センター(WOUDC)のデータを用いた。

## 用語解説

**渦位**：渦の強さを表す量。断熱変化で等温位面に沿った移動では渦位が保存量となるため、空気塊の追跡などに用いられる。

**オゾン全量**：地表から大気圏上端までの気柱に含まれる全てのオゾンを積算した量。仮に大気中のオゾンを全て1気圧、0として地表に集めたときに、オゾンだけからなる層の厚みをセンチメートル単位で測り、この数値を1000倍したもので、単位はm atm-cm(ミリアトムセンチメートル)またはDU(Dobson Unit;ドブソン単位)である。地球全体の平均的なオゾン全量は約300 m atm-cmで、これは地表で約3mmの厚さに相当する。

**オゾン層破壊物質**：成層圏オゾンを破壊する物質であり、通常、「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」によりその生産等が規制されている物質を指す。主要なものとして、クロロフルオロカーボン類(CFC-11、CFC-12、CFC-113など。これらを日本では一般にフロン類と呼ぶ場合がある)、四塩化炭素、ハイドロクロロフルオロカーボン類(HCFCs)、1,1,1-トリクロロエタン、塩化メチル、ハロン類、臭化メチルなどがある。また、これらのオゾン層破壊物質は温室効果ガスでもある。

**オゾン分圧**：ある高さにおける大気の圧力すなわち気圧は、大気を構成する窒素、酸素、アルゴン等それぞれの気体成分の圧力すなわち分圧の総和であり、その中でオゾンが占める圧力をオゾン分圧という。通常mPa(ミリパスカル)で表す。オゾン分圧が大きいほど、その層のオゾン量が多いことを示す。

**オゾンホール**：南極上空のオゾン量が極端に少なくなる現象で、オゾン層に穴のあいたような状態であることから名づけられた。南半球の冬季から春季にあたる8~10月ごろに発生発達し、11~12月ごろに消滅するという季節変化をしている。

**オゾンホールの規模**：オゾンホールの規模を定量的に表現するための世界的に統一された尺度はないため、気象庁では解説の便を考慮して、オゾンホールの状況を表す指標として、南緯45度以南における次の要素を定義し、人工衛星による観測資料を用いてこれらを算出し、公表している。

**オゾンホールの面積**：オゾン全量が220 m atm-cm以下の領域の面積(単位：km<sup>2</sup>)。オゾンホール発生以前には広範囲に観測されなかったとされるオゾン全量が220 m atm-cm以下の領域の面積であり、オゾンホールの広がりを目安を与える量。

**最低オゾン全量**：オゾンホール内のオゾン全量の最低値(単位：m atm-cm)。オゾンホールの深まりを目安を与える量。

**オゾン欠損量(破壊量)**：南緯45度以南のオゾン全量を300 m atm-cm(オゾン全量の全球平均値)に回復させるために必要なオゾンの質量(万トン単位)。オゾンホール内で破壊されたオゾンの総量を目安を与える量。

**極域成層圏雲(PSCs)**：PSCsはPolar Stratospheric Cloudsの略で、極域上空の成層圏気温が-78以下に低下した際に、硝酸や水蒸気から生成される雲である。通常、クロロフルオロカーボン類から解離した塩素の大部分は、下部成層圏ではオゾン層を破壊する作用のない塩素化合物の形で存在しているが、極域成層圏雲の表面での特殊な化学反応(不均一反応)により、塩素ガスとして大気中に大量に放出される。この塩素ガスに太陽光線が射すと、活性な塩素原子が放出され、オゾンの破壊が急激に進行する。オゾンホールの生成などには、この極域成層圏雲の発

生が大きく影響する。

気象庁ホームページ「オゾン層について」も参照のこと。

<http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-10ozone.html>

**極渦（極夜渦）**：北極および南極上空にできる、大規模な気流の渦のこと。極域上空の成層圏では、太陽光が射さない冬季（極夜）の間に、極点を中心として非常に気温の低い大気の渦が発達し、これを極渦あるいは極夜渦という。

**紅斑紫外線量・UV インデックス**：太陽光に含まれる紫外線を継続的に浴びると、皮膚が赤くなる（紅斑）などの変化が起きる。これが長年にわたって繰り返されると、皮膚ガンや白内障の発症率の増加など健康に悪影響を与えることが知られている。紅斑紫外線量は、人の皮膚に及ぼす影響を示すために、波長によって異なる影響度を考慮して算出した紫外線量である。なお、紅斑紫外線量を、日常生活で使いやすい簡単な数値とするために、指標化したものが UV インデックスである。波長別紫外線強度から紅斑紫外線量・UV インデックスを算出する方法は、気象庁ホームページ「UV インデックスを求めるには」

[http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/3-51uvindex\\_define.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/uvhp/3-51uvindex_define.html) を参照のこと。

**参照値**：オゾン・紫外線の変動を表すための基準として用いる一定期間の累年平均値。地上気温などでは 1981～2010 年の 30 年間平均値（平年値）との差によって気候変動や天候の異常を把握するのに対し、本報告書では、世界平均のオゾン量の減少傾向が止まり、オゾン量が少ない状態で安定していた 1994～2008 年の平均値との差に注目して記述しており、この平均値を「参照値」と呼ぶことがある。紫外線の記述においても、オゾン量の変動と比較しやすいようにオゾン量と同じ期間としている。なお、1994～2008 年の期間でデータの一部が存在しない要素については、平均期間が短くなっている。

**等価緯度**：等渦位線で囲まれた領域の面積を示す指標。ある渦位の等値線で囲まれる領域（内部の渦位が大きい）の面積が、極を中心とした緯度線で囲まれた面積と等しくなる時の緯度を、その渦位に対する等価緯度とする。等価緯度は、極渦の境界線の位置を定量的に把握するための解析に用いられるが（Nash *et al.*, 1996）第2章2-3節では、簡便な方法として、等価緯度北緯63度（領域面積が北緯63度以北の面積となる渦位）を春季の極渦の境界としている（Müller, 2008）。

**反転観測**：上空のオゾン量の鉛直分布を測定する観測方法の一つ。ドブソンオゾン分光光度計あるいはブリューワー分光光度計を用いて、天頂光の強度比を連続観測すると、太陽高度角が低くなるに従って2つの波長の強度比は初め増加し続けるが、途中から減少し始める。この強度比の変化の様子を「反転」呼び、反転現象を観測することを反転観測と呼ぶ。反転の様子はオゾン量の鉛直分布により異なるため、大気を高度別にいくつかの層に分けた層別のオゾン量を求めることが可能である。

**不均一反応**：気体分子が固体または液体の表面で起こす反応など、異なる相の間で起こる化学反応。極域では極域成層圏雲の、また中緯度帯においては成層圏の硫酸エアロゾルの表面で起きる不均一反応が、下部成層圏でのオゾン破壊に重要な役割を果たしている。

気象庁ホームページ「南極でオゾンホールが発生するメカニズム」も参照のこと。

[http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-22ozone\\_o3hole\\_mechanism.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-22ozone_o3hole_mechanism.html)

**偏差（％）**：偏差に（％）を付けて表現している場合、偏差（基準値からの差）を基準値で割った大きさ

を百分率で示している。本稿では、偏差の他に、偏差を標準偏差で割った値である規格化偏差も用いている。

**EESC** : Equivalent Effective Stratospheric Chlorineの略で、等価実効成層圏塩素のこと。成層圏における臭素と塩素のオゾン破壊能力に関する標準化された指標であり、オゾン層破壊物質の濃度の指標。クロロフルオロカーボン類（CFC類）の過去の放出量や地上での観測結果と、モデル計算に基づく成層圏での分解割合に基づき算出されている。  
気象庁の長期トレンド解析に用いているEESCについては、「オゾン層観測報告：2010」の「解説2 等価実効成層圏塩素（EESC）」を参照のこと。

**JRA-25** : Japanese 25-year Reanalysisの略で、対象期間1979～2004年の日本で行われた大気の長期再解析プロジェクトのこと(Onogi *et al.*, 2007)。気候の推移を正確に把握することを目的とし、季節予報モデルの高度化や気候研究のための高精度の気候データセットを気象庁と財団法人電力中央研究所の共同研究として作成した。このデータセットのことを指す場合もある。

**JRA-55** : Japanese 55-year Reanalysisの略で、対象期間1958年以降の日本で2度目となる大気の長期再解析プロジェクトのこと(Kobayashi *et al.*, 2015)。解析期間をJRA-25から大幅に拡張し、JRA-25以降の様々な開発成果を取り入れたデータ同化システムを用いて、過去半世紀以上の気候変化をより高精度に解析した気候データセットを提供した。このデータセットおよび同等のシステムにより提供されたリアルタイムの気候データのことを指す場合もある。

**NCEP-NCAR** : NCEP( National Centers for Environmental Prediction : 米国環境予測センター )と NCAR ( National Center for Atmospheric Research : 米国大気研究センター ) のこと。

**NOAA/NCEP** : 米国海洋大気庁 ( National Oceanic and Atmospheric Administration ) の米国環境予測センター ( National Centers for Environmental Prediction ) のこと。

**QBO** : Quasi-Biennial Oscillationの略で、準2年周期振動のこと。赤道付近の成層圏で、東風と西風が約2年の周期で交互に出現する現象。気温やオゾン量にも準2年周期振動があることが知られている。QBOとオゾン全量の変動の関係については、気象庁ホームページ「オゾン量の経年変化に影響を及ぼす自然変動」でより詳細に解説している。  
[http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-24ozone\\_o3variability.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/3-24ozone_o3variability.html)

**WOUDC** : World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre の略で、世界オゾン・紫外線資料センターのこと。世界気象機関（WMO）の全球大気監視（GAW）プログラムの下にカナダ気象局に設立され、世界中で観測されたオゾンおよび紫外線のデータを収集、管理、提供している。

## 参考文献

- 気象庁 (2009), オゾン層観測報告 : 2008.
- 気象庁 (2011), オゾン層観測報告 : 2010.
- 気象庁 (2014), オゾン層・紫外線の年のまとめ(2013年).
- 吉松和義, 永田和彦, 坂本尚章, 藤本敏文(2005), つくば上空のオゾン変動要因について, 気象庁研究時報, 57, 81-94.
- Deshler, T., J. L. Mercer, H. G. J. Smit, R. Stubi, G. Levrat, B. J. Johnson, S. J. Oltmans, R. Kivi, A. M. Thompson, J. Witte, J. Davies, F. J. Schmidlin, G. Brothers and T. Sasaki (2008), Atmospheric comparison of electrochemical cell ozonesondes from different manufacturers, and with different cathode solution strengths: The Balloon Experiment on Standards for Ozonesondes, *J. Geophys. Res.*, D113, D04307, DOI: 10.1029/2007JD008975.
- Estupinan, G., S. Raman, G. H. Crescenti, J. J. Streicher and W. F. Barnard (1996), Effects of clouds and haze on UV-B radiation, *Journal of Geophysical Research*, 101, 16807-16816.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi (2015), The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics, *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48.
- Miyagawa, K., T. Sasaki, H. Nakane, I. Petropavlovskikh and R. D. Evans (2009), Reevaluation of long-term Umkehr Data and Ozone profiles at Japanese stations, *J. Geophys. Res.*, 114, doi:10.1029/2008JD010658.
- Müller, R., J.-U. Groöf, C. Lemmen, D. Heinze, M. Dameris and G. Bodeker (2008), Simple measures of ozone depletion in the polar stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 251-264, doi:10.5194/acp-8-251-2008.
- NASA, (2012), SBUV (Version 8.6) MERGED TOTAL AND PROFILE OZONE DATA SETS, [http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data\\_services/merged/](http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/merged/).
- Nash, E. R., P. A. Newman, J. E. Rosenfield and M. R. Schoeberl (1996), An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity, *J. Geophys. Res.*, D101, 9471-9478, DOI: 10.1029/96JD00066.
- Newman, P. A., J. S. Daniel, D. W. Waugh and E. R. Nash (2007), A new formulation of equivalent effective stratospheric chlorine (EESC), *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4537-4552, doi:10.5194/acp-7-4537-2007.
- NOAA (2005), Northern hemisphere winter summary 2004-2005, [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/winter\\_bulletins/nh\\_04-05/index.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/winter_bulletins/nh_04-05/index.html).
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira (2007), The JRA-25 Reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 3 69-432.
- UNEP (2015), Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 assessment.
- WMO (1998), JOSIE-1996. WMO/GAW, 130, 108pp.
- WMO (2004), JOSIE-2000. WMO/GAW, 158, 147pp.
- WMO (2011), Scientific assessment of ozone depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project Report 52.
- WMO (2014), Scientific assessment of ozone depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project Report 55.



オゾン層破壊の科学アセスメント：2014  
政策決定者向けアセスメント  
Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014  
Assessment for Decision-Makers

総括要旨  
Executive Summary

モントリオール議定書の下で取られた対策は、大気中の規制対象オゾン層破壊物質の量を減少させ、オゾン層の1980年レベルへの回復を可能にしている。

・モントリオール議定書の下で規制されている物質の対流圏中の量は減少し続けている。主な規制対象オゾン層破壊物質の大部分は予想どおりに大きく減少したが、ハイドロクロロフルオロカーボン類（HCFC類）とハロン-1301は依然として増加している。四塩化炭素の量については、未知あるいは未報告の放出源がなければ説明がつかない。

・オゾン層破壊物質が分解してできる塩素や臭素を含む化合物の成層圏中の量は減少している。（等価実効成層圏塩素 EESC <sup>訳注 A</sup> によって見積もられた）塩素と臭素の量は2012年までに10～15年前のピーク時より10～15%減少した。メチルクロロホルム（ $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ）、臭化メチル（ $\text{CH}_3\text{Br}$ ）、クロロフルオロカーボン類（CFC類）の大気中の量の減少は、見積もられた減少分とほぼ対応している。

・オゾン全量は地球の大部分で1980年代から1990年代初めに減少した（南緯60～北緯60度の平均で約2.5%）。2000年以降ではオゾン全量は比較的变化がなく、予想されたとおり近年はわずかな増加の兆候を示している。上部成層圏では最近明らかなオゾンの増加が見られ、気候モデルによれば、オゾン層破壊物質の減少と二酸化炭素の増加による上部成層圏の冷却による影響が考えられる。

・現在のオゾン層破壊物質の量から予想されるように、南極オゾンホールは毎春の発生が続いている。2011年の冬/春、北極成層圏は特に低温となり、そのような状況下で予想されたとおり大規模なオゾン層破壊が起こった。

・モントリオール議定書が完全に遵守されれば、地球の大部分でオゾン全量は1980年レベルに回復するであろう。中緯度帯と北極では今世紀中頃より前に回復し、南極オゾンホールはそれよりいくらか後となると予測される。

南極オゾンホールは南半球の夏の地上の気候に大きな変化をもたらした。

・オゾン層破壊による南極の下部成層圏の冷却は、南半球対流圏の夏季大気循環において最近数十年に観測された変化の主な要因である可能性が非常に高い。この変化は地上気温や降水量、海洋への影響を伴う。北半球においては、成層圏オゾンの破壊と対流圏の気候との明瞭な関連は見出されていない。

オゾン層破壊物質が減少すると、二酸化炭素 ( $CO_2$ )、一酸化二窒素 ( $N_2O$ )、メタン ( $CH_4$ ) の変化はオゾン層に対してより大きな影響を持つようになるであろう。

・規制対象オゾン層破壊物質が減少すると、21 世紀後半のオゾン層の変動は大気中の  $CO_2$ 、 $N_2O$ 、 $CH_4$  に大きく依存するであろう。全般的に、 $CO_2$  と  $CH_4$  の増加は世界全体のオゾン量を増加させ、一方で  $N_2O$  の増加はさらに世界全体のオゾン層を破壊する。南極オゾンホールは、これらの物質の影響は比較的小さい。

・熱帯では、21 世紀中にオゾン全量の明瞭な減少が予測される。熱帯のオゾン量は、オゾン層破壊物質減少の影響は小さく、 $CO_2$ 、 $N_2O$ 、 $CH_4$  の増加による大気循環の変化<sup>訳注 B</sup>に影響される。

モントリオール議定書による気候への好ましい効果は、オゾン層破壊物質の代替として利用される HFC 類の将来の排出によってかなり相殺されてしまう可能性がある。

モントリオール議定書とその改正、調整は世界的な温室効果ガスの排出削減に大きく貢献した。2010 年において、モントリオール議定書によるオゾン層破壊物質の年間削減量は  $CO_2$  換算で年間約 100 億トンの排出抑制に相当すると推定されている。これは京都議定書の第一約束期間 (2008 ~ 2012 年)における年間削減量目標の約 5 倍である(オゾン破壊の科学アセスメント 2010 総括要旨より)。<sup>1</sup>

・オゾン層破壊物質の代替として現在使われているハイドロフルオロカーボン類 (HFC 類) の合計排出量は、 $CO_2$  換算で年間約 5 億トンの小さな寄与である。この排出量は現在、年間約 7% の割合で増加しており、今後も増加が続くと予測されている。

・HFC 類の現在の構成が変わらないとすると、需要の増加によって HFC の排出量は  $CO_2$  換算で 2050 年までに年間 88 億トンに上る可能性があり、これは 1980 年代後半の CFC 類のピーク時排出量である  $CO_2$  換算で年間約 95 億トンにほぼ匹敵する。<sup>2</sup>

・地球温暖化係数 (GWP)<sup>訳注 C</sup> の高い HFC 類の使用を GWP の低い化合物、あるいは別の技術<sup>訳注 D</sup> に置き換えれば、このような  $CO_2$  換算の排出量は本質的に回避されるであろう。

・こうした GWP の低い化合物の候補の一つはハイドロフルオロオレフィン類 (HFO 類) で、その一つ (HFO-1234yf) は大気酸化の過程で残留性のトリフルオロ酢酸 (TFA) を分解生成する。TFA の環境への影響は、今後数十年間は軽微であると考えられている一方で、さらに長期間の潜在的な影響は、TFA の環境残留性と HFO 類の将来利用の不確定性のために、将来の評価が必要かもしれない。

・2050 年までに、HFC の貯蔵物は  $CO_2$  換算で 650 億トンまで増加すると見積もられる。HFC の貯蔵物による気候変動への影響は、貯蔵物の蓄積を避けるため GWP が高い HFC 類の将来の利用を制限すること、あるいは貯蔵物を破壊することで減少させることができるかもしれない。

1 ここていう  $CO_2$  換算の排出量とは、すなわち GWP で重み付けされた排出量で、対象とする物質の排出量に 100

年間の地球温暖化係数を乗じたものとして定義する。温室効果ガスとしてのオゾン層破壊物質の効果の一部は、オゾンの変化による冷却により相殺される。

2 これは 1980 年代後半の化石燃料やセメントによる排出量の約 45%に相当する。

**モントリオール議定書締約国およびその他の政策決定者向けの追加の重要課題が確認された。**

・推定された寿命と正確に測定された大気中の量に基づいて算出された四塩化炭素 (CCl<sub>4</sub>) の排出量は、過去 10 年間に報告された生産量と使用量から算出された排出量よりはるかに大きくなった。

・2009 年時点で、臭化メチルのモントリオール議定書規制対象用途の消費量は、規制対象でない“検疫と出荷前処理”<sup>訳注 E</sup>用途の消費量を下回った。

・塩素や臭素を含む極短寿命物質 (VSLs) の人為的排出の増加は、特に熱帯起源のものは、成層圏オゾンにとって新たな課題である。VSLs の排出の寄与は、モントリオール議定書の下で規制されているオゾン層破壊物質が減少すると、相対的に重要となる可能性がある。

・今後数十年にわたって大気中のオゾン層破壊物質量が減少し続けると、成層圏における窒素酸化物の主な源である一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) が将来のオゾン層破壊において重要性を増すであろう。

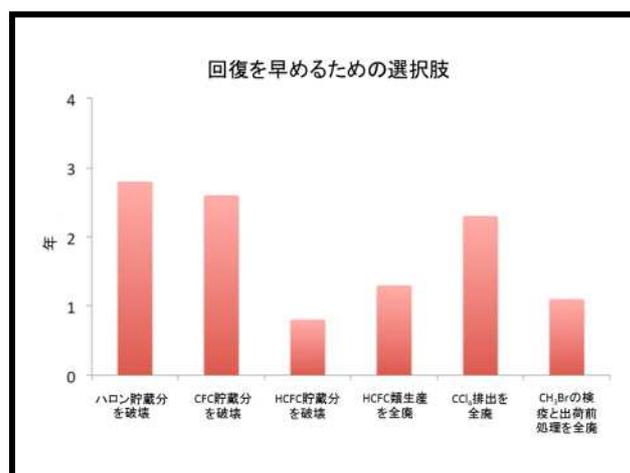
・HCFC-22 生産の副産物である HFC-23 の排出は、削減努力にもかかわらず続いている。

・オゾン層破壊物質の濃度が高い状態である間に、大規模な火山噴火やジオエンジニアリング活動<sup>訳注 F</sup>による成層圏の硫酸エアロゾルが大幅に増加すると、地球の大部分でオゾン層の大規模な化学的破壊が起こるだろう。

**これまでモントリオール議定書の下で取られた対策は、オゾン層破壊物質の生産や消費を大幅に削減したが、将来のオゾン層破壊を軽減するために追加の、しかし限定的な選択肢がある。**

・モントリオール議定書の遵守を仮定すると、現在の貯蔵物からの放出は、将来生産されるオゾン層破壊物質による放出よりもオゾン層破壊に寄与すると予測される。

・オゾン層の 1980 年レベルへの回復を早めるための考えられる選択肢をグラフに示す (中緯度の EESC を基に解析)。全ての貯蔵物や生産物からの排出をなくすことによる効果の累積により、この回復は 11 年早まる。



## 【訳注】

- A 等価実効成層圏塩素（EESC）については、「オゾン層・紫外線の年のまとめ（2014年）」巻末用語解説を参照。
- B CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>は主要な温室効果ガスであり、ここでは地球温暖化に伴う大気循環の変化のことを述べている。
- C 地球温暖化係数（GWP）とは、二酸化炭素以外の温室効果ガスの排出量を同等な効果をもつ二酸化炭素の排出量に換算する係数の一種で、地上気温の上昇量に基づいて定義される。
- D オゾン層を破壊せず、かつ地球温暖化にも寄与しない物質を用いることを指す。
- E ここでいう臭化メチルの検疫用途とは、検疫有害動植物(病気を含む)の進入、定着および拡散を防止するための用途、もしくはそれらの公的な管理を確保するための用途である。出荷前用途とは、輸入国の植物衛生上もしくは衛生上の要求に適合するため、もしくは輸出国の植物衛生上もしくは衛生上の要求に適合するため、輸出前および輸出に関して直接適用される処置である。（UNEP,2012）
- F ここでは地球温暖化緩和のため、大気中にSO<sub>2</sub>などを放出することを指している。

## 参考文献

UNEP(2012), Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer 9th edition.

# 謝辞

本書は、気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付オゾン層情報センターが作成し、内容に関する検討は、近藤洋輝 専門委員を部会長とする気候問題懇談会検討部会の協力を得た。

## 気候問題懇談会検討部会

|     |       |                           |       |
|-----|-------|---------------------------|-------|
| 部会長 | 近藤 洋輝 | 一般財団法人 リモート・センシング技術センター   | 参与    |
|     | 今村 隆史 | 独立行政法人 国立環境研究所 環境計測研究センター | センター長 |
|     | 日下 博幸 | 筑波大学 計算科学研究センター           | 准教授   |
|     | 須賀 利雄 | 東北大学 大学院理学研究科             | 教授    |
|     | 早坂 忠裕 | 東北大学 大学院理学研究科             | 教授    |
|     | 渡部 雅浩 | 東京大学 大気海洋研究所              | 准教授   |

(敬称略)