

南極昭和基地におけるドブソン分光光度計とブリューワー分光光度計の オゾン全量観測値の相互比較

上里 至*・上野 圭介*・津田 元気**

Inter-comparison of the Total Column Ozone between Dobson and Brewer Spectrophotometer at Syowa Station in Antarctica

UESATO Itaru, UENO Keisuke and TSUDA Genki

要旨

気象庁は2022年に南極昭和基地のオゾン層観測測器をドブソン分光光度計からブリューワー分光光度計へ移行し、変換関数を用いる手法によりオゾン全量観測の統計接続を行った。しかし、この手法は、変換関数を両測器の並行観測期間の観測値から経験的に求め、測器特性や観測値の算出方法の違いにより生じる系統的な差を正確に扱っていないため、将来的には的確なトレンド解析に支障をきたす可能性がある。このため、両測器間の系統的な差の要因と考えられる「オゾン吸収断面積の変更」、「オゾン有効温度の季節変動の影響」、「オゾン平均高度の違い」について、これらの補正の効果を検証した。

南極昭和基地におけるドブソン分光光度計(AD波長組観測とCD波長組観測がある)とブリューワー分光光度計のオゾン全量観測値を比較すると、補正前は測器間の差に大きな季節変動があり、その振幅はAD波長組観測との比較で2.3%、CD波長組観測との比較で3.2%であった。3つの差の要因を補正した結果、差の季節変動は改善し、その振幅はAD波長組観測との比較で0.6%、CD波長組観測との比較で0.5%となった。また、差の月平均値は、1年をとおして概ねWMO/GAWの要求精度である±1%以内となることを確認した。なお、補正後も残る両測器間の差は、測器校正方法の改善により解消できる可能性がある。

1. はじめに

南極昭和基地上空は、南極オゾンホールで広く知られる、人為起源のオゾン破壊が顕著に現れている場所である。気象庁では、IGY(International Geophysical Year: 国際地球観測年)を契機として、1961年に南極昭和基地(以下、昭和基地という)においてドブソン分光光度計(以下、ドブソン計という)によるオゾン全量観測¹を開始した。その後1966年にオゾンゾンデによるオゾン鉛直分布観測、1977年にドブソン計による層別オゾン量観測が加わり、1984年には昭和基地の観測データを使用して世界で初めて南極オゾンホールの観測が報告された(Chubachi 1984)。昭和基地のオゾン観測データは、オゾン層破壊が顕著に現れる以前から現在までのオゾン層の状態を記録する非常に貴重なデータであり、4年に1度発行される「WMO(世

界気象機関)/UNEP(国連環境計画)オゾン層破壊の科学アセスメント」において極域オゾン層の評価に貢献している(WMO 2018)。

ドブソン計により開始された昭和基地のオゾン全量観測は、2022年2月にブリューワー分光光度計(以下、ブリューワー計という)へ観測測器を移行した。昭和基地での測器移行には、低温下での安定性や大きく変化する太陽高度角に適した観測方法の確立等の運用面の調査の他に、両測器間のオゾン全量観測の統計接続が必要であった。Stachelin *et al.* (2003)は、観測測器の変更には3年以上の並行観測から変換関数を算出し、両測器間の統計接続を行うことを推奨しており、気象庁ではこれにより統計接続を行った。しかし、この統計接続に利用する変換関数は両測器の並行観測期間の観測値から経験的に求めたもの

*高層気象台 観測第二課

**気象庁 大気海洋部 予報課 航空予報室

¹ 観測地点上空における地上から大気上端までのオゾンの総量の観測

であり、測器特性や観測値の算出方法の違いにより生じる差を正確に扱っていないため、将来的には的確なトレンド解析に支障をきたす可能性がある。近年、両測器間の差の要因の補正方法についていくつか報告されており (Redondas *et al.* (2014), Mocini *et al.* (2019), 高野ほか(2019), Gröbner *et al.* (2021)), 今後、全世界で統一した手法でその補正が実施される見込みである。本稿では、事前にその補正の効果を評価するため、補正值がオゾン全量へ与える影響を検証すると共に、昭和基地のドブソン計とブリュワー計のオゾン全量の比較観測から補正の効果を評価した。本稿の構成は以下のとおり。

第 1 章：本稿に至る経緯を紹介する。

第 2 章：昭和基地におけるドブソン計とブリュワー計のオゾン全量の算出方法、及び昭和基地での測器運用等を紹介する。

第 3 章：両測器間に存在するオゾン全量の系統的な差の要因として考えられる「オゾン吸収断面積の変更」、「オゾン有効温度の季節変動」、及び「オゾン層平均高度の違い」がオゾン全量観測値へ与える影響を検証する。

第 4 章：昭和基地における 2013~2019 年のドブソン計とブリュワー計のオゾン全量比較観測から、両測器間のオゾン全量の差の特徴を調査すると共に補正の効果を評価する。

2. 昭和基地におけるオゾン層観測測器について

ドブソン計とブリュワー計は共に太陽の直達紫外線のスペクトル強度を用いたリモートセンシング観測測器であり、大気により減衰する紫外線スペクトルの強度からオゾン全量を算出する。この原理は以下の Beer-Lambert の法則(式(1))で説明される。



写真 1 昭和基地におけるドブソン分光光度計

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\tau(\lambda)\mu} \quad (1)$$

I_0 は大気外の紫外線照度、 I は地上での紫外線照度、 τ は大気の光学的厚さ、 μ は相対大気路程²である。オゾン全量は、複数の紫外線スペクトル強度(ドブソン計では強度比)の測定から以下の式で算出される。なお、両測器には分光素子、測定方法、測定波長、スリット関数等に違いがある。

$$X = \frac{\sum w_i \log I_0(\lambda_i) - \sum w_i \log I(\lambda_i) - \sum w_i \beta(\lambda_i) \mu_R}{\sum w_i \alpha(\lambda_i) \mu_{O_3}} \quad (2)$$

X : オゾン全量

I_0 : 大気外での紫外線スペクトル強度

I : 地上での紫外線スペクトル強度

α : オゾン吸収係数

β : レイリー散乱係数

μ_{O_3} : オゾン相対大気路程

μ_R : レイリー散乱相対大気路程

λ_i : スペクトル波長

w_i : スペクトル波長別の重み係数

2. 1 昭和基地のドブソン計について

ドブソン計(写真 1)は、プリズムにより分光した短波長と長波長の太陽紫外線スペクトルの強度比を測定する。測定波長組は、A 波長組、C 波長組、D 波長組の 3 組あり、通常は A 波長組と D 波長組の 2 つの測定値からオゾン全量を算出する。これを AD 波長組観測という。ドブソ



写真 2 昭和基地におけるブリュワー分光光度計

² 天頂の大気の厚さを 1 とした時、太陽直射光が通過する大気の厚さを相対比で表したもの

ン計では、大気中のエアロゾル等の影響をオゾン全量値に対して無視できるように、式(2)における4つの波長の重み係数 w_i を[+1.0, -1.0, +1.0, -1.0]としている。他にCD波長組観測も存在するが、AD波長組観測がより高精度なため、国内の観測では1年をとおしてAD波長組観測のみが行われる。しかし、AD波長組観測は太陽高度が低くなると観測不能となるのに対しCD波長組観測は低太陽高度でも観測が可能である。そのため、昭和基地では極夜前後の太陽高度が低い期間においてAD波長組に代わりCD波長組観測が実施されてきた。

2.2 昭和基地のブリューワー計について

ブリューワー計(写真2)は、回折格子により分光した4波長の太陽紫外線スペクトルの強度を測定し、その測定値からオゾン全量を算出する。ブリューワー計では、大気中の二酸化硫黄やエアロゾル等の影響を無視できるように、式(2)における重み係数 w_i を[+1.0, -0.5, -2.2, +1.7]としている。ブリューワー計の通常のオゾン全量観測をDS(Direct Sun)観測という。

ブリューワー計は、1993年に昭和基地において波長別紫外域日射観測装置として導入されたが、毎時の波長別紫外域日射観測の合間に試験観測としてDS観測を実施した。本報告におけるドブソン計との相互比較観測では、2013年から2019年までのブリューワー計の試験観測データを用いている。なお、同期間のブリューワー計のデータは、2021年に高層気象台で実施した戻り検定により観測値が確定している。

3. 両測器間の系統的な差の要因とその補正がオゾン全量観測値に与える影響の検証

ドブソン計とブリューワー計のオゾン全量観測値には季節に依存した差、及び平均的なバイアス等の系統的な差が存在し、その要因として「オゾン吸収断面積の変更」、「オゾン有効温度の季節変動」、及び「オゾン層平均高度の違い」が考えられている。本章ではこれらの要因について解説するとともに、それらの補正によるオゾン全量への影響を検証した。補正值の算出にはRedondas *et al.* (2014)や高野ほか(2019)を参考にした。

3.1 オゾン吸収断面積の変更による影響

オゾン全量算出式(式2)におけるオゾン吸収係数 α は、オゾンが紫外線を吸収する効率を表すオゾン吸収断面積を用いて算出される。現在、ドブソン計とブリューワー計のオゾン吸収断面積はBass and Parr(1985), Parr and Bass(1985)の実験値(以下、BPopという)を使用しているが、

近年、新しい実験値(Gorshlev *et al.* (2014), Serdyuchenko *et al.* (2014))が公開されており、国際オゾン委員会ではドブソン計とブリューワー計のオゾン吸収断面積を新しい値へ変更することを推奨している(Orphal *et al.* 2015)。なお、オゾン吸収断面積は温度依存性があり、新しい実験値は、「温度10K毎の実験値」と「温度の2次近似式の係数」の2種類の値で公開されている。ここでは前者をIUP、後者をIUPQという。これらの値は、IGACO(Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations)のACSO(Absorption Cross Sections of Ozone)のホームページにて取得した。
(https://igaco-o3.fmi.fi/ACSO/cross_section.html)

オゾン吸収断面積の変更がオゾン全量に与える影響について、新旧のオゾン吸収断面積からそれぞれオゾン吸収係数を算出し、そのオゾン吸収係数の変化量(%)から検証した。なお、式(2)のとおりオゾン吸収係数はオゾン全量の逆数となるため、オゾン全量はオゾン吸収係数と逆符号の変化量となる。

本報告におけるオゾン吸収係数 $\alpha(\lambda_i)$ は、ブリューワー計の標準手法であるオゾン吸収断面積 $\sigma(\lambda_i, T)$ とスリット関数 $S(\lambda_i)$ の畳み込みから算出した(式3)。なお、オゾン吸収断面積 $\sigma(\lambda_i, T)$ の温度 T は、現在観測で設定されている温度であり、ドブソン計で226.86K(-46.3°C)、ブリューワー計で228.16K(-45.0°C)とした。またドブソン計のスリット関数はBernhard *et al.* (2005)によりパラメタライズされた値、ブリューワー計については分光常数検定(伊藤ほか(2003))により算出した値を使用した。各測定波長の $\alpha(\lambda_i)$ に式(2)の重み係数 w_i をかけた総和が、オゾン吸収係数 α となる(式(4))。

$$\alpha(\lambda_i) = \frac{\int \sigma(\lambda_i, T) S(\lambda_i) d\lambda}{\int S(\lambda_i) d\lambda} \quad (3)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^4 w_i \alpha(\lambda_i) \quad (4)$$

表1にBPop, IUP, IUPQから算出したオゾン吸収係数を記す。なお、ドブソンのBPopは世界中全てのドブソン計で使用されているKomhyr(1993)の値とした。現在のBPopから新しいIUP及びIUPQへ変更した場合のオゾン吸収係数の変化量(%)は、ドブソン計のAD波長組で-0.7~-1.1%、同CD波長組で-0.9~-1.3%と小さくなり、ブリューワー計は+0.4~+0.8%と大きくなった。前述のとおりオゾン全量はオゾン吸収係数の逆数となるため、新しい吸収断面積へ変更した場合オゾン全量の変化量は以下の

表 1 ドブソン計とブリューワー計のオゾン吸収断面積別のオゾン吸収係数

BPop は現在使用しているオゾン吸収断面積, IUP と IUPQ が新しいオゾン吸収断面積である. 表中には BPop に対する IUP と IUPQ の変化量(%)も記す.

| ドブソン分光光度計 | | | | ブリューワー分光光度計 | | | |
|----------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 波長, 波長組 | BPop (Komh _{yr}) | IUP | IUPQ | 波長 | BPop | IUP | IUPQ |
| A 305.5 | | 1.897 | 1.901 | 310.033 | 1.0056 | 1.0017 | 1.0003 |
| A+ 325.0 | | 0.115 | 0.115 | 313.488 | 0.6772 | 0.6806 | 0.6765 |
| C 311.5 | | 0.860 | 0.856 | 316.782 | 0.3749 | 0.3727 | 0.3715 |
| C+ 332.4 | | 0.039 | 0.039 | 319.986 | 0.2947 | 0.2961 | 0.2950 |
| D 317.5 | | 0.377 | 0.375 | α | 0.3434 | 0.3448 | 0.3463 |
| D+ 339.9 | | 0.011 | 0.011 | 変化量 % | | 0.4 | 0.8 |
| A波長組 | 1.806 | 1.782 | 1.786 | | | | |
| C波長組 | 0.833 | 0.821 | 0.817 | | | | |
| D波長組 | 0.374 | 0.366 | 0.364 | | | | |
| AD波長組 | 1.432 | 1.416 | 1.422 | | | | |
| CD波長組 | 0.459 | 0.455 | 0.453 | | | | |
| AD変化量 % | | -1.1 | -0.7 | | | | |
| CD変化量 % | | -0.9 | -1.3 | | | | |

ようになる.

(オゾン吸収断面積変更後のオゾン全量の変化量)

ドブソン計 AD 波長組 : IUP で+1.1%, IUPQ で+0.7%,
 ドブソン計 CD 波長組 : IUP で+0.9%, IUPQ で+1.3%
 ブリューワー計 : IUP で-0.4%, IUPQ-0.8%

本稿で算出した IUP と IUPQ は, Redondas *et al.* (2014) や高野ほか(2019)と比較してドブソン計は+0.2%, ブリューワー計は-0.1%のわずかな差があるが, 補正值として大きな影響はない. また, IUP と IUPQ で算出したオゾン吸収係数が異なっていることは Redondas *et al.* (2014)でも同様である.

3. 2 オゾン有効温度の季節変動の影響

前述のとおり, オゾン吸収断面積には温度依存性があり, ドブソン計とブリューワー計では, オゾン量と気温の鉛直プロファイルからオゾン吸収断面積の温度を算出する(式(5)). この温度 T_{eff} をオゾン有効温度という.

$$T_{eff} = \frac{\int T(z)O_3(z)dz}{\int O_3S(z) dz} \quad (5)$$

両測器のオゾン有効温度 T_{eff} は全球で一定値を使用しているが, 実際には地域に依存した季節変動があり, それがおゾン全量の誤差となっている. そこで, オゾン有効温度の季節変動がおゾン全量に与える影響について, オゾン吸収断面積の温度依存性とオゾン有効温度の季節変動

から検証した.

はじめに, オゾン吸収断面積の温度依存性について, 温度の 2 次近似式で表される IUPQ を用いて調査した. IUPQ のオゾン吸収断面積 $\sigma(T)$ は式(6)で表され, $c_0, c_1, c_2,$ がそれぞれ 2 次近似式の係数として公開されている.

$$\sigma(T) = c_0 + c_1T + c_2T^2 \quad (6)$$

式(7)のように, 2 次近似式の係数に対してスリット関数との畳み込みを行うことで, 測定スリットに対する係数 C_{ij} を算出する. なお, i は測定波長の識別番号, j は係数の次数に対応する. C_{ij} に式(2)の重み係数 w_i をかけ(式(8)), その総和をとることで, オゾン吸収係数 $\alpha(T)$ を温度の 2 次近似式として扱うことができる(式(9)).

$$C_{ij} = \frac{\int c_j(\lambda_i)S(\lambda_i)d\lambda}{\int S(\lambda_i) d\lambda} \quad (7)$$

$$C_j = \sum_{i=1}^4 w_i C_{ij} \quad (8)$$

$$\alpha(T) = \sum_{j=0}^2 C_j T^j \quad (9)$$

式(8)で算出した測定波長毎の温度の 2 次近似式の係数 C_i を表 2 に記す. また, 図 1 にオゾン有効温度に対するオゾン吸収係数 $\alpha(T)$ の変化量(%)を示す. なお, 変化量(%)

表 2 ドブソン計とブリューワー計の観測に使用するオゾン吸収係数の温度に関する 2 次近似式の係数

| | ドブソン分光光度計 | | ブリューワー分光光度計 |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | AD波長組 | CD波長組 | DS観測 |
| C_2 | 1.0341×10^{-5} | 4.8861×10^{-6} | 7.3054×10^{-8} |
| C_1 | 2.4470×10^{-3} | 1.0929×10^{-3} | 1.5757×10^{-5} |
| C_0 | 1.5129 | 4.9267×10^{-1} | 3.4720×10^{-1} |

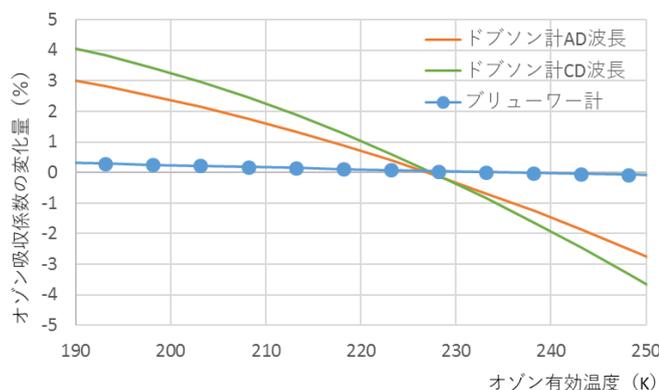


図 1 ドブソン計とブリューワー計のオゾン有効温度に対するオゾン吸収係数の変化量(%)

橙実線がドブソン計 AD 波長組、橙点線が CD 波長組、青線がブリューワー計の変化を示す。

は、オゾン有効温度がドブソン計で 226.86K (-46.3℃)、ブリューワー計で 228.16K (-45.0℃)におけるオゾン吸収係数からの変化である。ドブソン計の AD 波長組(橙実線)と CD 波長組(橙点線)はともにオゾン吸収係数が温度依存性をもつが、ブリューワー計(青線)については温度依存性が非常に小さかった。オゾン有効温度が 1K 変化したときのオゾン吸収係数の変化量(%)は以下ようになる。

(オゾン吸収係数の温度依存性※)

- ドブソン計 AD 波長組 : 0.104% / K
- ドブソン計 CD 波長組 : 0.140% / K
- ブリューワー計 : 0.007% / K

※ドブソン計は 226.86K、ブリューワー計は 228.16K における曲線の接線の傾きから算出

次に、オゾン有効温度の季節変動について、図 2 に 2013 年から 2019 年の昭和基地(青線)とつくば(橙線)のオゾン有効温度の時系列を示す。オゾン有効温度の算出には、JRA55 長期再解析データ(Kobayashi *et al.* (2015)) のオゾン混合比と気温の 1000hPa から 1hPa の指定面データを使

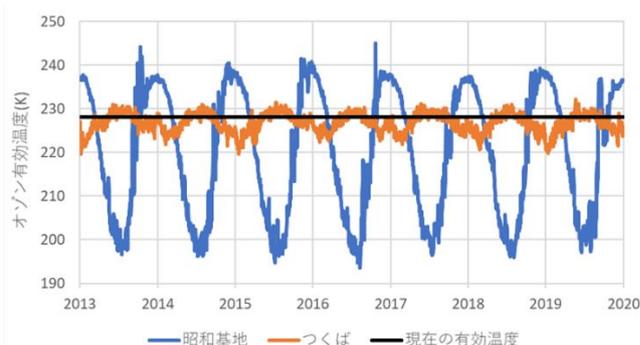


図 2 2013 年から 2019 年の昭和, 及びつくばにおけるオゾン有効温度の季節変化

橙線がつくば、青線が昭和を示す。また現在固定値で使用しているオゾン有効温度を参考に黒線で示す。本データは、JRA55 長期再解析データから算出した。

用した。また、同図に現在ブリューワー計で使用しているオゾン有効温度 228.16K を黒線で示す。オゾン有効温度は両半球の夏季に高く、冬季に低くなる季節変動を持ち、特に昭和基地(青線)の季節変動はつくば(橙線)に比べ非常に大きく、振幅は 7 倍以上であった。また、昭和基地の南極オゾンホール期は、その年の南極オゾンホールの規模によりオゾン有効温度が大きく変わっていた。

このことから、現在一定値としているオゾン有効温度(黒線)は適当でなく、特に昭和基地では誤差が大きくなる。前述のオゾン吸収係数の温度依存性を基に、2013~2019 年の昭和基地におけるオゾン有効温度の季節変動を考慮するとオゾン全量の変化量は以下ようになる。

(オゾン有効温度の季節変動によるオゾン全量の変化)

- ドブソン計 AD 波長組 : 約-1.9~+2.6%
- ドブソン計 CD 波長組 : 約-2.5~+3.6%
- ブリューワー計 : ±0.3%未満

3. 3 オゾン層平均高度の違いによる影響

式(2)におけるオゾン相対大気路程 μ_{O_3} は、以下の式(10)で計算される。 θ は太陽天頂角³、 R_e は地球半径、 r は観測点の海拔高度、そして h は観測点におけるオゾン層平均高度である。オゾン平均高度 h はオゾン鉛直プロファイルから算出されるオゾン層の重心の高度で、緯度によ

$$\mu_{O_3}(\theta) = \frac{(R_e + h)}{((R_e + h)^2 - (R_e + r)^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (10)$$

³ 太陽が天頂にあるときを 0 度、水平線にあるときを 90 度とする角度

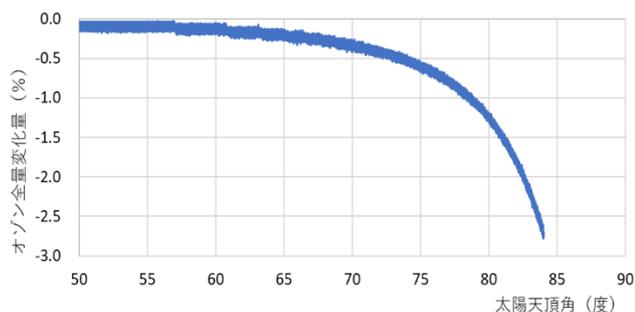


図3 オゾン平均高度を 22km から 19km に変更した場合の太陽天頂角に対するブリューワー計のオゾン全量の変化量(%)

て変化する。ドブソン計ではそれを考慮して緯度別に高度を変えているのに対し、ブリューワー計では全球で同じ高度で計算しており、昭和基地におけるオゾン平均高度は、ドブソン計が 19km、ブリューワー計が 22km となっている。ブリューワー計のオゾン平均高度をドブソン計の値に合わせ、オゾン相対大気路程を再計算した場合のオゾン全量へ与える影響を検証した。図 3 に太陽天頂角に対するオゾン全量の変化量を示す。オゾン全量は、太陽天頂角が大きくなるにつれ少なく観測され、概ね 74 度より大きくなると減少量が-0.5%から-2.8%まで急激に拡大した。

ブリューワー計は観測種別毎で観測可能な太陽天頂角の範囲(正確にはオゾン相対大気路程の範囲)が決まっており、本稿次章の比較観測で使用する DS 観測は概ね 74 度が上限であるので、その変化量は $\pm 0 \sim -0.5\%$ となる。一方、昭和基地では、極夜前後で一日をとおして太陽が高く昇らない(太陽天頂角が大きい)時期があり、その時期は FZ(Focused Sun)観測⁴により太陽天頂角 84 度までのオゾン全量を観測する。オゾン平均高度の変更は FZ 観測のオゾン全量に対して大きな影響がある。

(オゾン平均高度変更後のオゾン全量の変化量)

ドブソン計 : $\pm 0\%$ (高度変化なしのため)
 ブリューワー計 : $\pm 0 \sim -2.8\%$
 (DS 観測の場合は $\pm 0 \sim -0.5\%$)

4. オゾン全量の比較観測結果

4.1 オゾン全量の比較観測データセット

昭和基地において、ドブソン計とブリューワー計のオゾン全量を比較するため、以下のとおりデータセットを作成した。

(比較観測データセット)

比較期間：2013～2019 年

使用測器：(ドブソン計) D119, D122

(ブリューワー計) B168

観測種別：(ドブソン計) AD 波長組, CD 波長組

(ブリューワー計) DS 観測

観測時間差：5 分以内

相対大気路程：(ドブソン計 AD 波長組) 3.5 以下

(ドブソン計 CD 波長組) 2.4 以上

(ブリューワー計 DS 観測) 4.5 以下

データセット数：(AD 波長組と DS 観測) 2560

(CD 波長組と DS 観測) 2163

ドブソン計の AD 波長組と CD 波長組の観測値には測器固有の差が存在するため、気象庁では CD 波長組観測値に対して AD 波長組観測値に合わせるよう補正を行っているが、本比較では未補正の CD 波長組観測値を使用することとした。また、ブリューワー計で実施している FZ 観測や両測器で極夜期に実施する月光観測については、本比較では対象としていない。

4.2 補正前後のオゾン全量観測値の比較結果

観測値の比較結果において、本稿ではドブソン計 AD、CD 波長組に対するブリューワー計 DS 観測値の相対的な差(%)を“測器間の差”として定義する。図 4 に、補正前のドブソン計とブリューワー計の比較結果を示す。左図は時系列図で、曲線は測器間の差の季節変動を表しており、右図はオゾン有効温度と測器間の差の相関図である。補正前は、極夜前後に正偏差が大きくなるような季節変動があり、CD 波長組との比較でより顕著であった。季節変動成分の振幅は AD 波長組との比較で 2.3%、CD 波長組との比較で 3.2%であり、これは WMO/GAW で要求されている観測精度 $\pm 1\%$ よりも大きい。また、測器間の差はオゾン有効温度に対して負の相関があり、近似直線の傾きは CD 波長組との比較でより大きかった。

3 章で示した差の要因について、式(11)及び(12)により両測器のオゾン全量の補正を行った。なお、オゾン平均高度については、式(10)から算出した μ を使用して、事前に全てのオゾン全量観測値の再計算を行っている。

⁴ 測定した太陽直射光から太陽周辺散乱光の影響を除去することで、太陽天頂角が大きい時のオゾン全量観測を可能にする

南極昭和基地におけるドブソン分光光度計とブリューワー分光光度計のオゾン全量観測値の相互比較

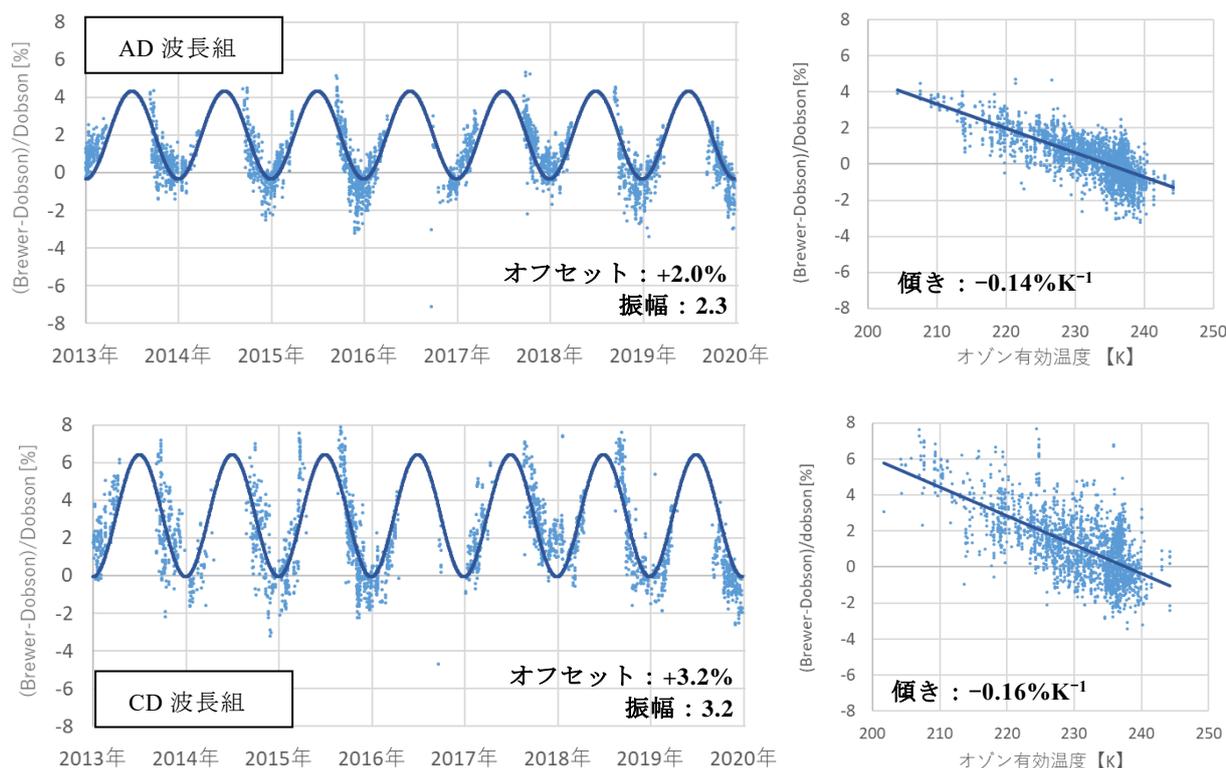


図4 昭和基地における2013年から2019年のドブソン計とブリューワー計の比較結果(補正前)

【上段：ドブソン計 AD 波長組との比較，下段：ドブソン計 CD 波長組との比較】

左図はドブソン計を基準としたブリューワー計のオゾン全量との測器間の差のプロットを時系列で示し、その季節変動成分を曲線で示す。また、図中に季節変動成分の振幅とオフセットを記す。右図はその差をオゾン有効温度に対する相関として示し、その近似直線を示すとともに、図中に傾きを記す。

$$X_{\text{corr}} = X_{\text{org}} \times \frac{\alpha_{BP}(T_0)}{\alpha_{IUPQ}(T)} \quad (11)$$

$$\alpha_{IUPQ}(T) = \sum_{j=0}^2 C_j T^j \quad (12)$$

X_{org} : 補正前のオゾン全量. μ 再計算後の値

X_{corr} : 補正後のオゾン全量

α_{BP} : オゾン吸収断面積 BP によるオゾン吸収係数

α_{IUPQ} : オゾン吸収断面積 IUPQ によるオゾン有効温度を考慮したオゾン吸収係数

T_0 : 現在使用しているオゾン有効温度

(ドブソンは 226.86 K, ブリューワーは 228.16 K)

T : 再解析データから算出した日々のオゾン有効温度

C_j : オゾン吸収係数の 2 次の温度相関係数

幅は AD 波長組との比較で 0.6%, CD 波長組との比較で 0.5%となった。また、オゾン有効温度に対する近似直線の傾きが小さくなり、負の相関は大きく解消した。

このことから、補正は測器間の差の季節変動に対して特に有効であり、これは「オゾン有効温度の季節変動」の補正の効果が特に大きいことを示している。補正後の差の平均は、AD 波長組との比較観測では-0.7%, CD 波長組との比較観測では-0.6%で WMO/GAW の要求精度±1%以内となった。

測器間の差の季節変化についてより詳細に解析するため、月別の測器間の差を箱ひげ図で図6に示す。AD 波長組との比較結果では、測器間の差の月平均値は1年を通して概ね±1%以内であるが10~12月に負偏差がやや大きくなる傾向があった。CD 波長組との比較結果では、測器間の差の月平均値は±1%以内にあるがほぼ全期間でばらつきが大きかった。

補正後の観測値による比較結果を同様に図5に示す。補正の結果、測器間の差の季節変動は概ね解消し、その振

4.3 補正後も残るオゾン全量観測値の差の要因

4.2で示したとおり、測器間の差の要因は補正後も

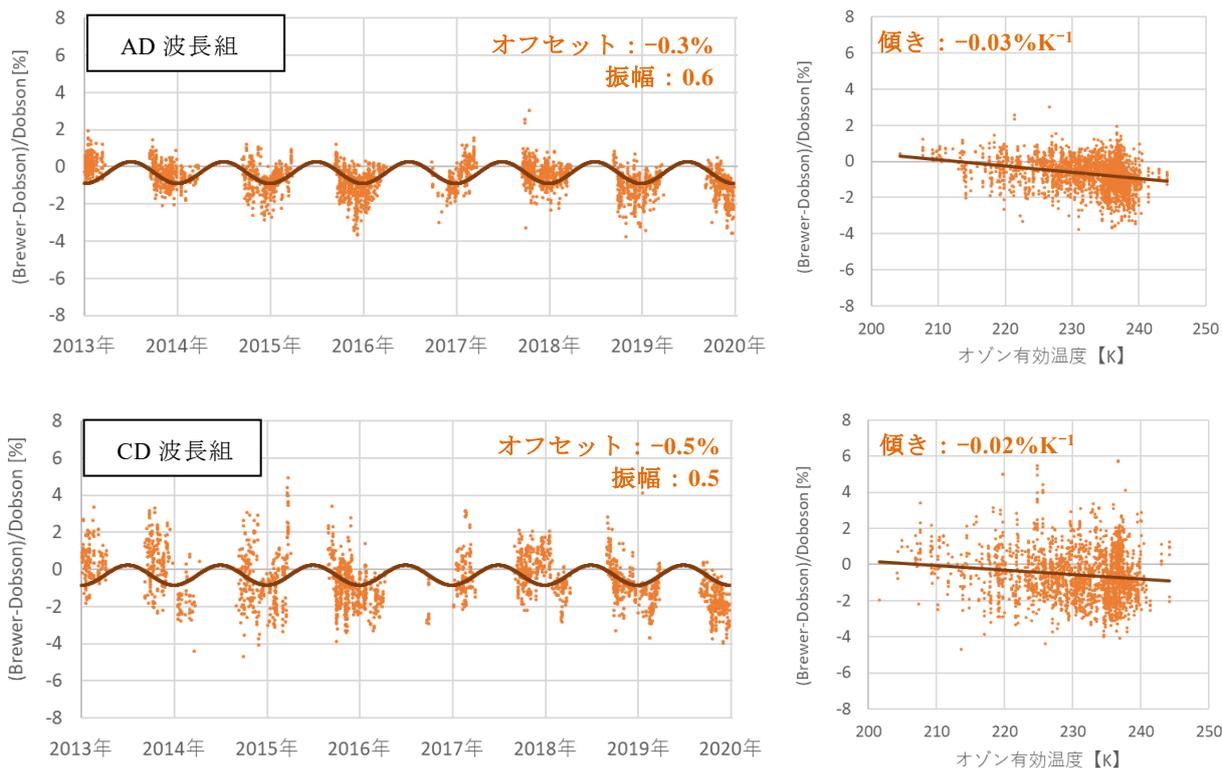


図 5 昭和基地における 2013 年から 2019 年のドブソン計とブリューワー計の比較結果(補正後)

【上段：ドブソン計 AD 波長組との比較，下段：ドブソン計 CD 波長組との比較】

図の説明は図 4 と同じ。

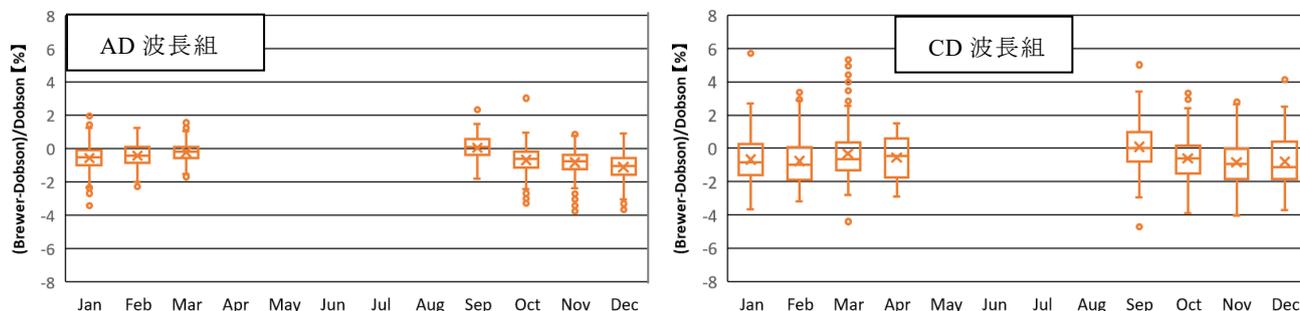


図 6 ドブソン計に対するブリューワー計のオゾン全量の月別の測器間の差の箱ひげ図

【左図：ドブソン AD 波長組との比較，右図：ドブソン CD 波長組との比較】

箱の両端はデータの第 1 四分位と第 3 四分位，上下のひげはそれぞれ最大値と最小値であるが，四分位範囲(箱の長さ)の 1.5 倍以上のデータは，最大，最小に含めずに外れ値としてプロットしている。

AD 波長組との比較では 10～12 月に負偏差がやや大きく，CD 波長組との比較では測器間の差のばらつきが大きい。そこで，その要因を探るために，通過大気オゾン量⁵に対する測器間の差を調査した。通過大気オゾン量は，ブリューワー計の校正値の評価で一般的に利用される値で，校正値が何らかの誤差を持つと通過大気オゾン量への依存性として現れる。またドブソン計 2 台の観測値を分けて

ブリューワー計と比較する(比較期間中ドブソン 2 台は同時に運用していない)ことで，同一測器における器体毎の差についても調べた。結果を図 7 に示す。AD 波長組の比較において，D119 と D122 では通過大気オゾン量が少な

⁵ オゾン相対大気路程とオゾン全量の積で表され，太陽光が通過する大気に含まれるオゾン量

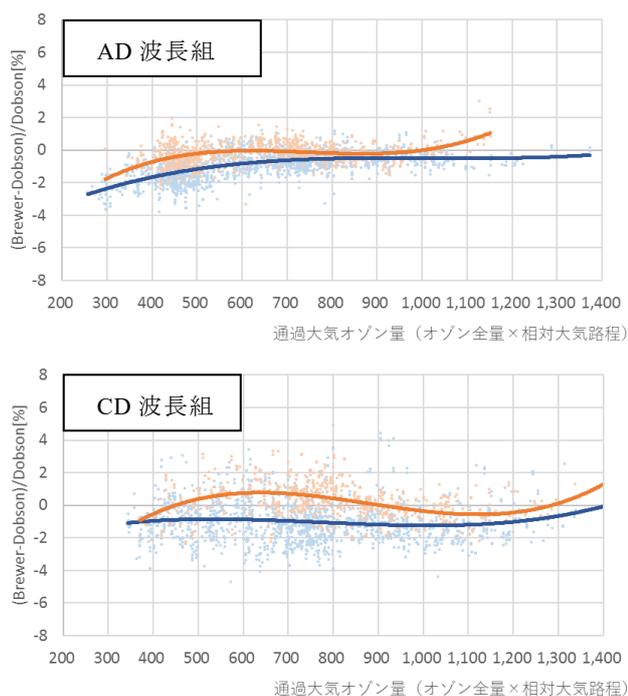


図7 通過大気オゾン全量に対する器体別のドブソン計とブリューワー計の測器間の差

【上図：AD波長組との比較，下図：CD波長組との比較】

青線がドブソン計 D119 との比較，橙線がドブソン計 D122 との比較結果を示す。図中の曲線はそれぞれのプロットの 3 次近似曲線である。

い時に器体差があり，D119 では通過大気オゾン量が少なくなるにつれ負偏差が大きくなる。D119 での負偏差は，南極オゾンホール等で通過大気オゾン量が少ない 10～12 月にやや大きな負偏差になることと対応している。CD 波長組での比較において，D119 では負偏差の傾向だが，D122 ではやや正偏差の傾向があり，この偏差傾向の違いが大きくなばらつきの要因と考えられる。

2 台のドブソン計に存在する差は，各測器の校正値に由来すると考えられ，測器固有の校正値をより正確にすることで測器間の差が解消する可能性がある。なお，現時点で D119 と D122 のどちらの観測精度がより正確かを判断することは出来ず，ブリューワー計の校正値の不確かさについても検証する必要がある。

5. まとめと課題

2022 年に南極昭和基地のオゾン層観測測器をドブソン計からブリューワー計に移行した。移行にあたり，測器間の差の要因と考えられる 3 つの要因の補正値を算出し，ドブソン計とブリューワー計の比較結果を用いてその補正の効果を検証した結果，以下の事がわかった。

- ・補正前の観測値の差にはオゾン有効温度に依存した大きな季節変動があったが，補正後は概ね解消した。
- ・補正後の差を詳細に解析した結果，AD 波長組との比較では，10～12 月に負偏差がやや大きく，CD 波長組との比較では差のばらつきが大きい傾向がある。
- ・ブリューワー計に対して 2 台のドブソン計を器体別で比較したところ，AD 波長組での比較において，D119 では通過大気オゾン量が少ないときに負偏差が大きくなる。また，CD 波長組での比較において，D119 と D122 では偏差の傾向が異なっており，ばらつきが大きい要因となっていた。

両測器間の差の要因の補正は，ドブソン計とブリューワー計のオゾン全量の均質化に有効であり，補正後の両測器の差は年間を通して概ね WMO/GAW の要求精度内となることを確認した。しかし，同一測器には測器校正に由来すると考えられる器体間の差があり，特に通過大気オゾン量が少ない時の観測値の差は，南極オゾンホールの評価に影響を与えるため，より正確な測器校正が必要である。

測器校正に由来する差の要因として考えられるものにドブソン計のオゾン吸収係数がある。ドブソン計は全ての器体で同じオゾン吸収係数を使用しているが，実際には異なることが報告されており (Köhler *et al.* (2018))，昭和基地のドブソン計についても正確なオゾン吸収係数を算出することで，器体間の差を解消できる可能性がある。正確なオゾン吸収係数を算出するため，任意の波長の紫外線スペクトルを入射してドブソン計の測定波長とスリット幅を正確に検定する手法を現在開発中である。

両測器間の差の要因の補正は，世界的に統一した手法で実施される予定であり，本報告では暫定的ではあるがその補正の効果を確認することができた。現在，世界的に統一した手法による補正の実施に向け，これまでの観測値と点検値の見直しを含めた再計算環境の構築を進めているところである。

謝 辞

本報告にあたり，本庁大気海洋部の南極観測事務室の皆様，及び南極地域観測隊員の皆様には比較観測データの取得のため，多大なご協力を頂いた。また，本庁大気海洋部の環境・海洋気象課オゾン層観測係の皆様，及びオゾン層解析係の皆様には解析に使用するデータをご提供頂いた。これらの方々に厚く御礼申し上げる。

引用文献

- Bass A.M. and Paur R.J. (1985) : The ultraviolet cross-sections of ozone: I: The measurements. *Ozone Symposium*, Greece. https://igaco-o3.fmi.fi/ACSO/files/Bass_Paur_Atmospheric_Ozone_1984.pdf (2023.03.01 閲覧)
- Bernhard G., Evans D., Labow J. G., and Oltmans J. S. (2005) : Bias in Dobson total ozone measurements at high latitudes due to approximations in calculations of ozone absorption coefficients and air mass. *Journal of Geophysics Research*, **110**, D10305.
- Chubachi S. (1984) : Preliminary result of ozone observation at Syowa Station from February 1982 to January 1983. *Memoirs of National Institute of Polar Research*, Special Issue, **34**, 13 - 19.
- Gorshchev V., Serdyuchenko A., Weber M., Chehade W. and Burrows J. P. (2014) : High spectral resolution ozone absorption cross-sections - Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293K. *Atmos. Meas. Tech.*, **7**, 609 - 624.
- Gröbner J., Schill H., Egli L., and Stübe R. (2021) : Consistency of total column ozone measurements between the Brewer and Dobson spectroradiometers of the LKO Arosa and OMPD/WRC Davos. *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 3319 - 3331.
- 伊藤真人・Savastiouk V., Brohart M. (2003) : ブリュウワー分光光度計用分光常数校正装置の開発と手法. 高層気象台彙報, **63**, 31 - 40.
- Köhler U., Nevas S., McConville G., Evans R., Smid M., Stanek M., Redondas A. and Schonenborn F. (2018) : Optical characterization of three reference Dobsons in the ATMOZ Project - verification of G.M.B. Dobson's Original specifications. *Atom. Meas. Tech.*, **11**, 1989 - 1999.
- Kobayashi S., Ota Y., Harada A., Ebita A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Miyaoka K., and Takahashi K. (2015) : The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Jour. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5 - 48.
- Komhyr, W.D., Mateer, C.L. and R.D. Hudson (1993) : Effective Bass-Paur 1985 Ozone Absorption Coefficients for Use with Dobson Ozone Spectrophotometers. *J. Geophys. Res.*, **98** (D11), 20451 - 20465.
- Mocini O., Zaniani Z. V., McElory C. T., Tarasick D. W., Evans R. D., Petropavlovskikh I., and Feng K. H. (2019): The effect of instrumental stray light on Brewer and Dobson total ozone measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 271 - 279.
- Orphal J., Staehelin J., and Tamminen J. (2015) : Absorption Cross-Sections of Ozone (ACSO) Status Report as of December 2015. *WMO/GAW Report*, No.218, 48pp.
- Paur R.J. and Bass A.M. (1985) : The ultraviolet cross-sections of ozone: II: Results and temperature dependence The measurements. *Ozone Symposium*, Greece. https://igaco-o3.fmi.fi/ACSO/files/Bass_Paur_Atmospheric_Ozone_1984.pdf (2023.03.01 閲覧)
- Redondas A., Evans R., Stübi R., Köhler U., and Weber M. (2014) : Evaluation of the use of five laboratory-determined ozone absorption cross sections in Brewer and Dobson retrieval algorithms. *Atmospheric Chemistry Physics*, **14**, 1635 - 1648.
- Serdyuchenko A., Gorshchev V., Weber M., Chehade W. and Burrows J. P. (2014) : High spectral resolution ozone absorption cross-sections - Part 2: Temperature dependence. *Atmos. Meas. Tech.*, **7**, 625 - 636.
- Staehelin J., Kerr J., Evans R., and Canicek K. (2003) : Comparison of Total Ozone Measurements of Dobson and Brewer Spectrophotometers and Recommended Transfer Functions. *WMO/GAW Report*, No.149, 39pp.
- 高野松美・中野辰美・上野圭介・藤原宏章 (2019) : オゾン全量観測測器の特性調査. 高層気象台彙報, **76**, 11 - 16.
- WMO (2018) : Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018. *WMO Global ozone Research and Monitoring Project-Report*, No.58, 590pp.