

オゾン全量観測測器の特性調査

高野 松美*・中野 辰美*・上野 圭介*・藤原 宏章*

Investigation on the characteristics of total ozone observation instruments

Matsumi TAKANO, Tatsumi NAKANO, Keisuke UENO and Hiroaki FUJIWARA

要旨

現在気象庁では、オゾン全量観測用の測器としてドブソン分光光度計およびブリューワー分光光度計が使用されている。しかし、両測器の観測値には差異があることが、世界気象機関(WMO)で報告されている。そこで、札幌、つくばおよび那覇の3地点で観測された過去資料からその差異を求め、測器間の特性を調査した。その結果は以下のとおりである。

- 1) 両測器間の観測値には3地点の年平均で約1.0%の差があり、それは、ブリューワー分光光度計の観測値がドブソン分光光度計よりも大きく、両測器間には系統的な差があることが確認された。また、この系統的な差には季節変動があり、その差は冬が夏よりも大きく、また高緯度地点で明瞭だった。
- 2) オゾン全量算出に関わるオゾン吸収係数には、波長依存性および温度依存性があるため、これらを考慮して観測値を補正した。その結果、補正前よりも、全体的に系統的な差の絶対値が小さくなり、季節変動の幅も小さくなった。これらの結果より、係数の見直しには両測器間の系統的な差を軽減する効果があると評価した。

1. はじめに

オゾン全量は、ある地点における地表から大気上端までの大気の柱に存在するオゾンの総量である。オゾンは、上空10～50 kmのオゾン層付近にそのほとんどが集中して存在しているため、オゾン全量を観測することによりオゾン層の状態を監視することができる。気象庁は、国際的なオゾン層保護のための取り組みに基づいて、オゾン全量の観測を、札幌、つくば、那覇、南鳥島および南極昭和基地で1950年代後半から長期にわたり実施しており、東アジアおよび南極域における観測網として重要な役割を果たしている。なお、これらの観測資料は、「オゾン層・紫外線の年のまとめ」として毎年気象庁から公表されるとともに、WMO 世界オゾン紫外線データセンター(WOUDC)へも報告され公表されている。

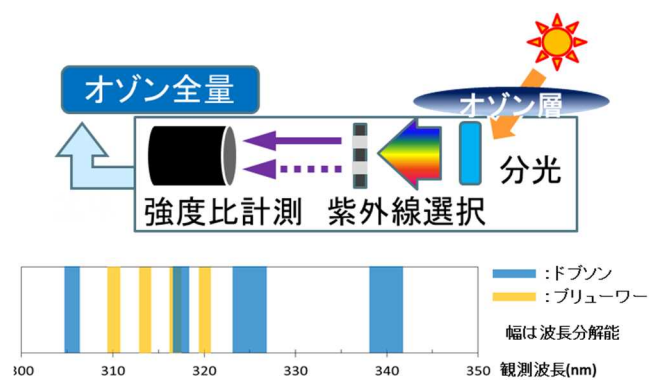
気象庁がオゾン全量観測に用いている測器は、ドブソン分光光度計(以下、ドブソンという)であるが、紫外域日射観測に用いているブリューワー分光光度計(以下、ブリューワーという)でも調査用にオゾン全量観測をしている。近年、世界的には自動観測が可能なブリューワーを使用する地点が増加している。しかし、世界気象機関(WMO)の

報告によると、両測器の観測値には系統的な差があることが指摘されており、主観測測器を変更するためには3年以上の並行観測を実施し、測器の特性および観測値の連続性を評価することが重要としている(WMO:2003)。このような状況により、気象庁における観測網の測器変更を想定した両測器の特性把握の必要性が高まってきたことから、両測器によるオゾン全量観測値の特性調査を実施した。また、WMOでは、両測器の系統的な差を低減するために、オゾン全量算出に必要な係数の見直しが検討されている(WMO:2015)。そこで、本調査では、今後の係数変更の勧告を想定し、その効果を評価した。

2. オゾン全量観測測器の特徴

ドブソンとブリューワーの基本的な観測原理は共通であり、オゾン層を含む大気を通過した太陽光を分光して、オゾンに吸収されやすい波長の紫外線とオゾンに吸収されにくい波長の紫外線の波長組を選択し、それらの強度比を測定することによりオゾン全量を算出する。但し、ドブソンとブリューワーでは図1に示すとおり、分光方式および観測波長が異なる。また、ドブソンでは大気路程($\mu=1.5, 2.5$)で指定された時刻に観測するのに対して、ブリューワーは設定可能な任意の時刻に自動観測を行う。こ

*高層気象台 観測第二課



	ドブソン	ブリュワー
分光方式	プリズム	回折格子
中心観測波長 (nm)	305.5, 317.5 325.0, 339.9	310.0, 313.5 316.8, 320.0

図1 オゾン全量観測測器の特徴

ここで、式(1)にドブソンの、式(2)にブリュワーのオゾン全量算出式を示す(Albert : 2012).

$$X_{DB} = \frac{\ln \frac{I_{305.5}}{I_{325.0}} - \ln \frac{I_{317.5}}{I_{339.9}} - B_1}{A_1 \times \mu} \quad (1)$$

$$X_{BR} = \frac{\ln \frac{I_{316.8}}{I_{310.0}} - 0.5 \times \ln \frac{I_{316.8}}{I_{313.5}} - 1.7 \times \ln \frac{I_{320.0}}{I_{316.8}} - B_2}{A_2 \times \mu} \quad (2)$$

X_{BR} : ブリュワーのオゾン全量値(m atm-cm (DU))

X_{DB} : ドブソンのオゾン全量値(m atm-cm (DU))

I_λ : 各観測波長 λ (nm)における放射強度

A_1, A_2 : ドブソンおよびブリュワーのオゾン吸収係数

B_1, B_2 : ドブソンおよびブリュワーの大気外常数

μ : オゾン層を通過する太陽放射の垂直路程に対する実際路程の比(大気路程)

3. 調査方法および結果

本調査では、ドブソンおよびブリュワーの過去の観測値を統計的に解析するため、両測器の観測時刻の差による観測値の違いを避けるために、両測器の観測時刻が±10分以内に収まっている観測資料を抽出し、比較調査用のデータセットを作成した。対象地点は、国内においてドブソンおよびブリュワーの両方でオゾン全量観測を行っている札幌、つくばおよび那覇で、対象期間は2010～2016年とした。次にこのデータセットを用いて、オゾン全量観測値の系統差(3.1)の有無、およびオゾン吸収係数の変更の効果(3.2)について調査した。なお、ブリュワーは、オゾン全量の主観測測器ではないが、オゾン全量算出に必要な測器常数は、測器の定期点検時に校正され、適切に管理されているため、本調査で使用する観測

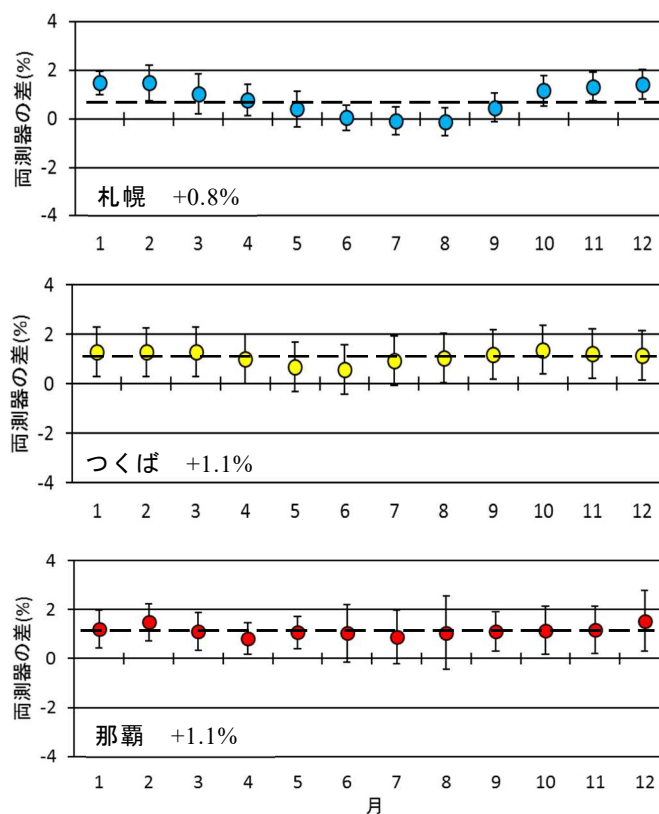


図2 札幌、つくばおよび那覇における両測器の差の月平均値

グラフの縦線は標準偏差を、横破線およびの数値は両測器の差の年平均値を示す。

値に支障はない。

3.1 特性調査

両測器によるオゾン全量観測値の差異を把握するために、以下の式(3)により「両測器の差」(以下Dという)を求めた。このDは、ブリュワーのオゾン全量がドブソンに対して何%大きい(小さい)かを示し、Dが+の場合は、ブリュワーのオゾン全量がドブソンより大きいことを表す。

$$D = \left(\frac{X_{BR} - X_{DB}}{X_{DB}} \right) \times 100 \quad (3)$$

各地点におけるDの月平均値を図2に示す。この図から両測器間には系統的な差があることがわかる。その大きさの年平均値は、3地点の平均では+1.0%、各地点のDは、札幌で+0.8%、つくばおよび那覇で+1.1%と、ブリュワーの値がドブソンの値より約1%前後大きいことが判明した。また、その差には、冬に大きくなり、夏に小さくなる季節変動があり、高緯度の観測点ほど明瞭であった。この系統的な差について、WMO(2003)では、大気路程に対し

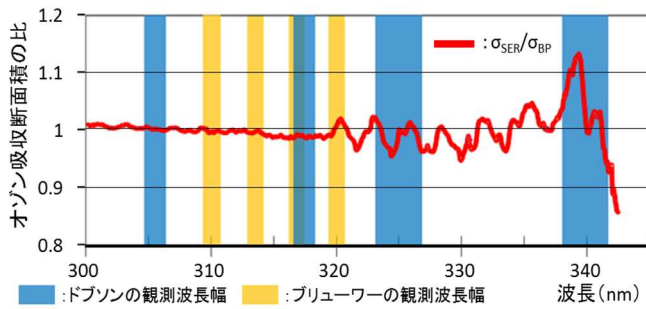


図3 波長別のオゾン吸収断面積の比($\sigma_{\text{SER}}/\sigma_{\text{BP}}$)

て線形依存性があるが、統計的な手法により補正可能としている。また、差の季節変動の要因として、観測波長によっては、成層圏温度の影響を受けやすいためとしている。そのため、成層圏温度の変化が比較的大きい高緯度の観測点で、差の季節変動が大きくなったと考えられる。

3.2 オゾン吸収係数の見直しに対する効果の評価

WMO では、両測器間の系統的な差の要因として、オゾン全量の算出に必要なオゾン吸収係数(以下、 α という)の扱い方の違いを指摘している。そのため、WMO では、精密な実験に基づく α の見直しおよびそれをを用いた補正方法が検討されている(WMO: 2015)。そこで本調査では、この α の見直しによる効果を評価するために、以下の①～③に関して調査した。

- ①オゾン吸収係数 α の波長依存性
- ②オゾン吸収係数 α の温度依存性
- ③①および②によるオゾン全量の補正結果

① オゾン吸収係数 α の波長依存性

WMO ではオゾン吸収係数 α を算出するためのオゾン吸収断面積(以下、 σ という)の見直しが検討されている。ここで、 α の算出式を式(4)に示す(Redondas et al.: 2014)。

$$\alpha(\lambda) = \frac{\int \sigma(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

$S(\lambda)$: 波長 λ におけるスリット幅に対する重み関数

この σ について、現在の観測では、Bass and Paur(1984a)の値(以下、 σ_{BP} という)が用いられているが、見直し案として Gorshchev et al.(2014)および Serdyuchenko et al.(2014)の値(以下、 σ_{SER} という)への変更が検討されている。オゾン吸収断面積の比($\sigma_{\text{SER}}/\sigma_{\text{BP}}$)は、図3に示すとおり波長依存性があるため、 σ を変更した場合の α 及び観測値への影響を調査する必要がある。そこで、 σ_{SER} を用いて α を再計算し、新旧の α の変化率からオゾン全量の変化率を算出し、 σ の変更に伴うオゾン全量観測値への影響を調査した。ここで、新しい α は、式(4) および Redondas et al.(2014)に

表1 オゾン吸収係数(α)の再計算後の地点別の変化率

	α の変化率(%)		
	札幌	つくば	那覇
ブリューワー	-0.5	-0.4	-0.4
ドブソン	+0.9	+0.9	+0.9

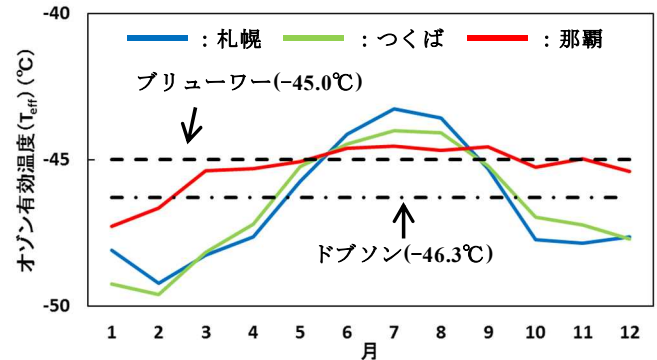


図4 地点別の月平均オゾン有効温度(T_{eff})の年変化
破線のブリューワーおよび一点鎖線のドブソンの値は、現在使用されているオゾン有効温度を示す。

基づいて、3 地点のドブソンおよびブリューワーについて以下のとおり再計算した(式(5)および式(6))。

ドブソンの α

$$\alpha = \alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2) + \alpha(\lambda_3) - \alpha(\lambda_4) \quad (5)$$

$\lambda_1 \sim \lambda_4$: ドブソンの観測波長(nm)

λ_1 : 305.5, λ_2 : 325.0, λ_3 : 317.5, λ_4 : 339.9

ブリューワーの α

$$\alpha = -\alpha(\lambda_1) + 0.5 \times \alpha(\lambda_2) + 2.2 \times \alpha(\lambda_3) - 1.7 \times \alpha(\lambda_4) \quad (6)$$

$\lambda_1 \sim \lambda_4$: ブリューワーの観測波長(nm)

λ_1 : 310.0, λ_2 : 313.5, λ_3 : 316.8, λ_4 : 320.0

その結果、3 地点それぞれの新旧の α の変化率は表1となり、 σ 変更による効果は、3 地点の平均で、オゾン全量が、ドブソンでは約0.9%増加し、ブリューワーでは約0.4%減少することが判明した。3.1において、ブリューワーとドブソンには年平均で1.0%の系統的な差(ブリューワー>ドブソン)があったことから、 α の波長依存性を考慮した補正により、系統的な差を小さくする効果が確認できた。なお、本調査に使用した σ は次の URL から取得した(<http://igaco-o3.fmi.fi/ACSO/>)。

② オゾン吸収係数 α の温度依存性

α について、Kerr(2002)は温度依存性があることを示しているが、現状では、その算出に必要な温度であるオゾン

有効温度(高度別オゾン量による加重平均温度, 以下, T_{eff} という)は, ドブソンでは -46.3°C , ブリュウワーでは -45.0°C と固定されている. しかし, 実際の T_{eff} は図 4 で示すとおり, 地点および季節によって異なるため, α の算出には T_{eff} の変動を考慮する必要がある. なお, T_{eff} は, 夏にバラツキが比較的小さかった. また, T_{eff} は式(7)で算出される(Thomas and Holland : 1977).

$$T_{eff} = \frac{\int_{Z_0}^{\infty} T(Z)X(Z)dz}{\int_{Z_0}^{\infty} X(Z)dz} \quad (7)$$

$T(Z)$: 高度 Z における気温($^{\circ}\text{C}$)

$X(Z)$: 高度 Z におけるオゾン分圧(mPa)

そこで, T_{eff} の変動が与えるオゾン全量への影響を調査するために, T_{eff} の 1°C あたりの変化に対するオゾン変化量($\% / ^{\circ}\text{C}$)(以下, β という)を, Redondas et al.(2014)に基づいて, 式(8)よりドブソンおよびブリュウワーの両方で算出し比較した.

$$\beta = \frac{100}{\alpha_0} \times \sum C_1(\lambda) + 2 \times C_2(\lambda) \times T_0 \quad (8)$$

α_0 : 現在使われているオゾン吸収係数

C_1, C_2 : 観測波長 λ における係数(Serdyuchenko et al. : 2014)

T_0 : 現在使われているオゾン有効温度

(ドブソン: -46.3°C , ブリュウワー: -45.0°C)

この結果, β はドブソンで $0.1082\% / ^{\circ}\text{C}$, ブリュウワーで $0.0126\% / ^{\circ}\text{C}$ となり, ドブソンのオゾン全量がブリュウワーと比べ T_{eff} の 1°C の変化に対し 9 倍程度大きく変化することが判明した. この結果は, Redondas et al.(2014)の結果とほぼ一致する. また, このことから, T_{eff} の季節変動が大きい高緯度地点で, オゾン全量への影響が大きいと推測される. そこで, 各地点において求めた β でオゾン全量を式(9)により補正し, 補正前後での月平均の系統的な差を比較した. なお, $(T_{eff} - T_0) > 0$ の場合は, オゾン全量を減らし, $(T_{eff} - T_0) < 0$ の場合は, オゾン全量を増やす方向へ作用する.

$$X_{\beta} = X_0 \times \left\{ 1 - \frac{\beta}{100} \times (T_{eff} - T_0) \right\} \quad (9)$$

X_{β} : β で補正後のオゾン全量

X_0 : 補正前のオゾン全量(観測値)

β : 1°C あたりのオゾン変化量($\% / ^{\circ}\text{C}$)

T_{eff} : 月平均オゾン有効温度(観測値)

T_0 : 現在使われているオゾン有効温度

(ドブソン: -46.3°C , ブリュウワー: -45.0°C)

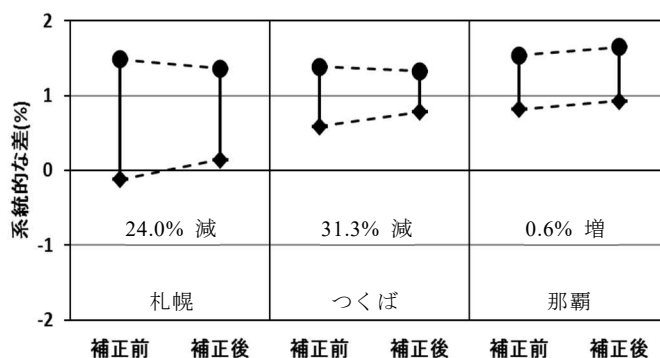


図 5 オゾン全量を β で補正する前と後における, 系統的な差の月平均値の最大値および最小値の差(季節変動幅)

●が最大値, ◆が最小値, その間の縦線が差を示し, 縦線が短いほど季節変動幅が小さいことを示す. また, 数値は補正前後での季節変動幅の増減を示す.

図 5 に, 系統的な差の月平均値の最大値および最小値の差(以下, 季節変動幅という)を補正前後で比較した結果を示す. T_{eff} の季節変動の大きい札幌およびつくばにおいて, 補正後に系統的な差の季節変動幅が札幌では 24.0%, つくばでは 31.3%小さくなった. 一方, 那覇では 0.6%大きくなったが, これは補正前後でほぼ変わらないと言える.

以上のことから, α の温度依存性を考慮した場合, T_{eff} の影響は, ドブソンがブリュウワーより大きく, また, T_{eff} の変動の大きい観測点では, 系統的な差の季節変動を小さくする効果があることが認められた.

③ ①および②によるオゾン全量の補正結果

オゾン吸収係数の両依存性の補正効果を評価するために, 次式(10)によりブリュウワーおよびドブソンのオゾン全量観測値を補正し, 補正後のオゾン全量(X')について, 3. 1 と同様に両測器の系統的な差(%)を求めた.

$$X' = X_0 \times \left\{ \frac{\alpha_{BP}}{\alpha_{SER}} - \frac{\beta}{100} \times (T_{eff} - T_0) \right\} \quad (10)$$

X_0 : 補正前のオゾン全量

各地点における補正前後の系統的な差の月平均値を図 6 に示す. この結果, 各観測点における系統的な差の年平均値は, 札幌で $+0.8\%$ から -0.7% , つくばおよび那覇では $+1.1\%$ から -0.2% , 3 地点平均では $+1.0\%$ から -0.4% となり, 補正後はドブソンのオゾン全量がブリュウワーよりも逆に大きくなったが, 全体的にその絶対値は小さくなった. また, 系統的な差の季節変動の幅が, 補正後は, 札幌で 24.8%, つくばで 32.7%, 那覇で 6.2%程度, 3 地点ともに

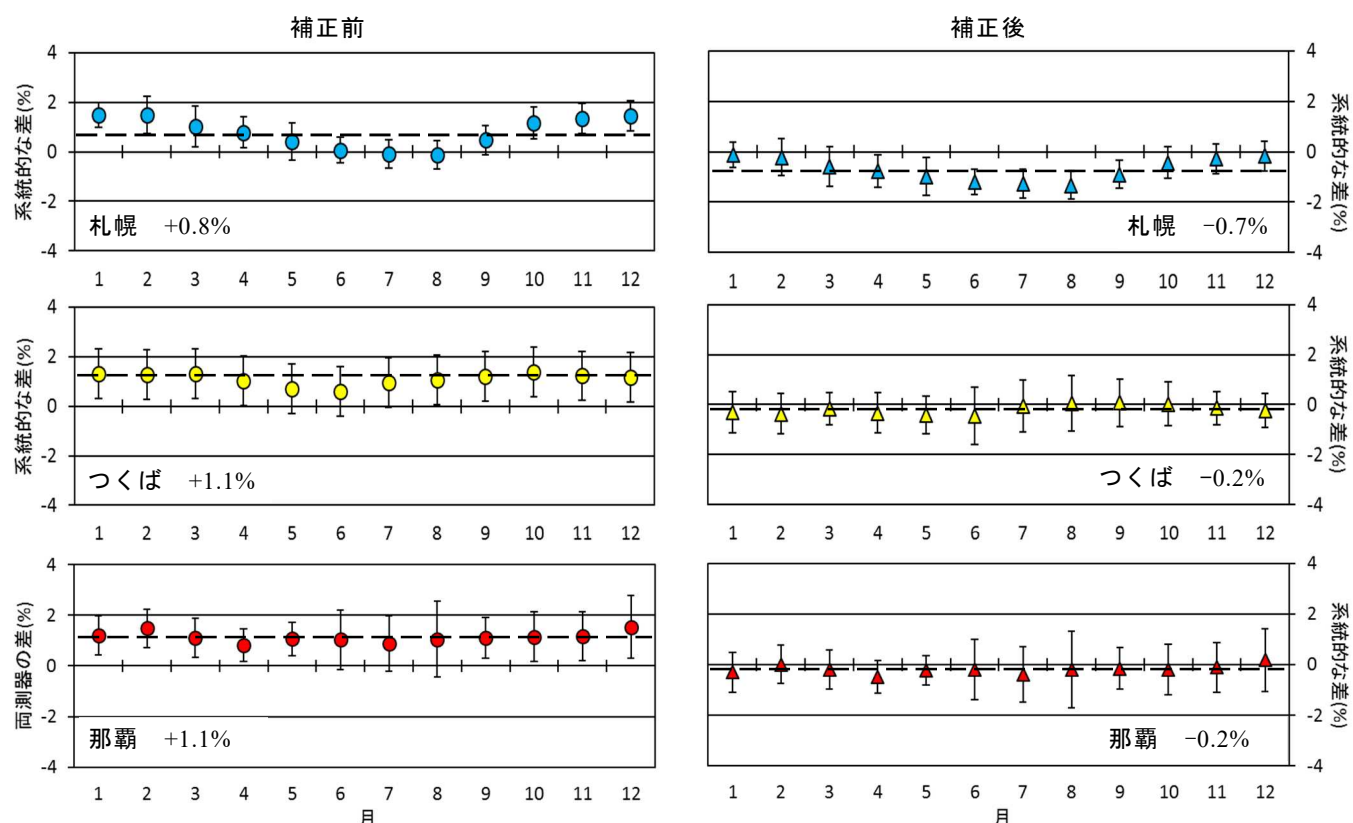


図 6 オゾン吸収係数(α)の波長および温度の依存性を考慮した補正をする前および後におけるオゾン全量の系統的な差の月平均値

上から札幌、つくばおよび那覇で、左側が補正前、右側が補正後。また、グラフの縦線は標準偏差を、横破線およびの数値は系統的な差の年平均値を示す。

小さくなり、 α の見直しによる両測器の系統差が軽減される効果が認められた。

一方で、札幌のように、この補正だけでは季節変動を全て除去することができなかった。この要因の一つとして、季節によって観測数が μ に対して偏りがあることが考えられる。これについての解析は今後の課題としたい。

4. まとめと今後

オゾン全量観測測器変更を想定した場合のドブソンとブリューワーの観測値の特性の違いを把握するために、両測器によるオゾン全量観測値を、札幌、つくばおよび那覇について調査した。調査のために、両測器の観測時刻が ± 10 分以内に収まっている観測資料を抽出し、比較調査用のデータセットを作成し、両測器の観測値を精密に比較した。

その結果、両測器の観測値には、ブリューワーの値がドブソンよりも大きくなる系統的な差があり、その大きさは、年平均値で、札幌では 0.8%、つくばおよび那覇では 1.1%、3 地点の平均では 1.0%となった。また、その差に

は、冬に大きくなり、夏に小さくなるという季節変動があり、その変動は高緯度の観測地点ほど明瞭であった。

WMO では、この系統的な差の要因としてオゾン吸収係数の扱い方の違いを指摘しており、係数の見直しが検討されている。そこで、本調査では、オゾン吸収係数の波長依存性および温度依存性に着目してオゾン全量を統計的に補正し、その効果を評価した。その結果、系統的な差の年平均値が、札幌で+0.8%から-0.7%、つくばおよび那覇では+1.1%から-0.2%、3 地点平均では+1.0%から-0.4%となり、補正後では全体的に系統的な差の絶対値が小さくなった。また、系統的な差の季節変動について、月平均値の最大値および最小値の差(季節変動幅)が、補正後は補正前よりも、札幌で 24.8%、つくばで 32.7%、那覇で 6.2%小さくなった。

以上の結果より、オゾン吸収係数の波長及び温度の依存性を考慮した補正を適用することで、両測器間の系統的な差の絶対値およびその季節変動の変動幅が小さくなる効果を確認できた。このことは、主観測測器を変更した場合の観測値の連続性を検討する上で重要な情報となる。

気象庁では、オゾン吸収係数の見直し手法が WMO から勧告された場合は、その勧告された手法に従って過去のオゾン全量観測値の再計算を実施して、観測値の連続性を確保することになる。

なお、今後は気象庁の観測網の一つである南極昭和基地の観測資料についても同様な調査を進める予定である。

謝 辞

本報告は、「ブリューワー分光光度計とドブソン分光光度計の特性についての比較調査(H25～H29 年度)」およびオゾン層情報センターとの共同調査である「オゾン全量観測測器移行プロジェクト(H28～H29 年度)」で得られた成果に基づいており、これらに携わった方々には大変お世話になりました。また、山田眞吾元高層気象台長には数々のご助言を賜り、オゾン層情報センター上里至オゾン層解析係長には、オゾン有効温度のデータを提供していただきました。関係された皆様に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Albert, O. N. (2012) : The Influence of the effective ozone temperature on OMDOAO3. *Royal Netherlands Meteorological Institute*
- Bass, A. M. and R. J. Paur (1984a) : The ultraviolet cross-sections of ozone: I: The measurements. *Ozone Symposium*, Greece
- Bass A. M. and R. J. Paur (1984b) : The ultraviolet cross-sections of ozone: II: Results and temperature dependence The measurements. *Ozone Symposium*, Greece
- Gorshchev, V., A. Serdyuchenko, M. Weber, W. Chehade and J. P. Burrows (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
- Kerr, J. (2002) : New methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra. *J. Geophys. Res.*, Vol.107, 4731
- Redondas, A., R. Evans, R. Stuebi, U. Köhler and M. Weber (2014) : Evaluation of the use of five laboratory-determined ozone absorption cross sections in Brewer and Dobson retrieval algorithms. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1635-1648
- Serdyuchenko, A., V. Gorshchev, M. Weber, W. Chehade and J. P. Burrows (2014) : High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 2:Temperature dependence. *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 625-636
- Thomas, R. W. L. and A. C. Holland (1977) : Ozone estimates derived from Dobson direct sun measurements: effect of atmospheric temperature variations and scattering, *Appl. Optics*, 16, 613-618
- WMO(2003) : Comparison of Total Ozone Measurements of Dobson and Brewer Spectrophotometers and Recommended Transfer Functions. *WMO/GAW*, No.149, 39pp
- WMO(2015) : Absorption Cross-Sections of Ozone (ACSO) Status Report as of December 2015. *WMO/GAW*, No.218, 48pp