

ドブソンオゾン分光光度計オゾン吸収係数の測器間補正の試み

清水 悟*・上野 圭介*・梶原 良一**

Approach to Improve the Ozone Absorption Coefficients on each Dobson Ozone Spectrophotometer

Satoru SHIMIZU*, Keisuke UENO* and Ryoichi KAJIHARA**

要旨

オゾン観測で使用しているドブソンオゾン分光光度計の測器定数は、基準器との比較観測によって決定している。しかし、測器定数の決定には様々な誤差が伴う。これらの誤差には、光学系の調整に伴う誤差がある。これまでの校正方法では、この誤差は検討されなかった。今回、光学系において重要な S1 スリットと S2 スリットの調整について考察することで、測器によってオゾン吸収係数が異なることがわかった。その結果、これまでオゾン全量の計算過程で確定値として全測器で使用されているオゾン吸収係数に、それぞれの測器に固有の修正率を掛けることで、光学系の調整に伴う誤差を解消できることがわかった。

1. はじめに

ドブソンオゾン分光光度計は、オゾン全量値を観測する測器として各国で使用されている。そして、各測器の測器定数の決定の際に、基準器との比較観測を実施し、解析することで、基準器と同様のオゾン全量値が得られるよう常数を決定している。

しかし、測器定数の決定には様々な誤差が伴う。大きく分けて、比較観測時の測器の操作や気象状況等に伴う誤差と、それぞれの測器固有の特性ともいわれてきた誤差によるものである。この測器固有の特性としての誤差は、基準器との差分データにおいて顕著にあらわれる。今回はこの光学系の調整に伴う誤差について検討した。

なお、ドブソンオゾン分光光度計に関わる用語および比較観測については、気象庁(1970)、気象庁(1991)、JMA、WMO(2003)、宮川(1999)、宮川ほか(2002)、押木ほか(2014)を参照していただきたい。

2. 測器定数の決定時における様々な誤差

比較観測時の誤差の要因は、雲の影響、測器の向き、サンディレクターの調整、Q レバーの設置、R ダイアルの読み等がある。なお、日本国内の測器は自動化システムが導入され、基準器と比較器共に使用されており、サンディレクターの調整、Q レバーの位置および R ダイアル

の読みに伴う誤差は他の誤差と比べて小さいと考えられる。また、雲の影響はお互いの測器を近づけて測定することで、測器の向きは比較観測時に監視を強化することで誤差を小さくすることが出来る。

残る誤差の要因としては、光学系の調整、Q 表があるが、Q 表の決定には、測器内部の各部の温度と測器温度の測定から生ずる誤差等の問題があるため誤差の評価は難しく、別の機会に議論することとする。

次項から光学系の調整に伴う誤差について検討していく。

3. オゾン吸収係数と観測時に使用される波長の考察

光学系の調整に伴う誤差についてみるために、ドブソン分光光度計の光学系とオゾン吸収係数について述べる。

ドブソン分光光度計光学系の模式図を Fig.1 に示す。サンディレクターによって S1 スリットから測器内に導入された太陽光は、P1 プリズムによって分光され S2 スリットおよび S3 スリットに到達する。分光された太陽光のうち、オゾンによる吸収の強い(波長の短い)紫外線が S2 スリットを、オゾンによる吸収の弱い(波長の長い)紫外線が S3 スリットをそれぞれ通過する。

オゾン全量の計算には、これらの紫外線の強度比とオゾン吸収係数(オゾンによる吸収を受ける前後の光の強度比)を用いる。

*高層気象台 観測第三課 **元熊谷地方気象台

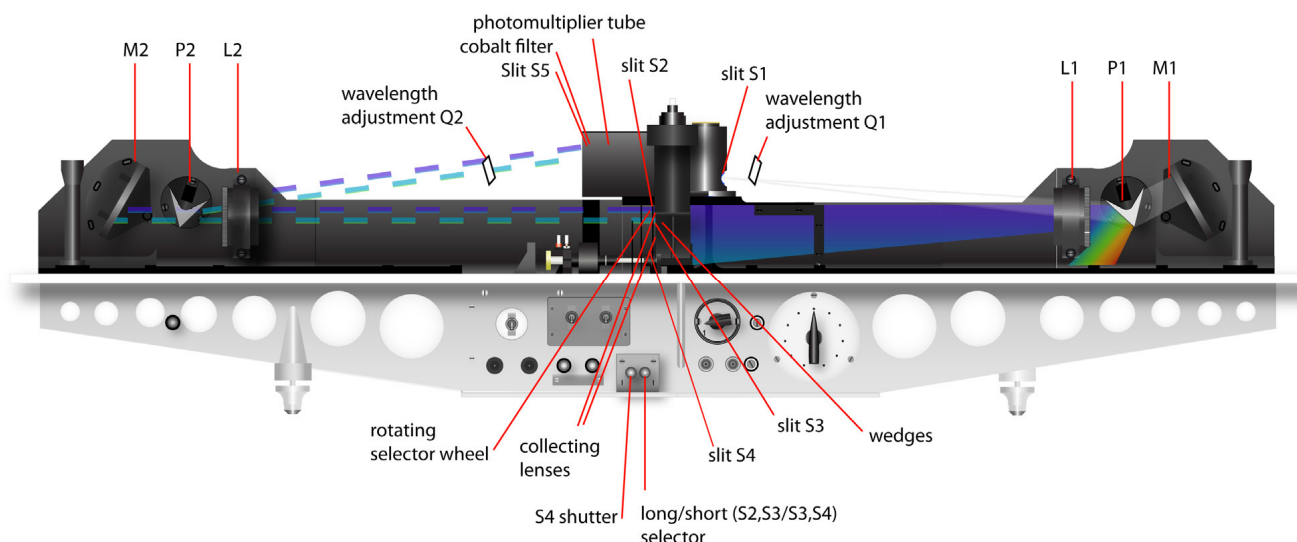


Fig.1 Optical system of the Dobson spectrophotometer (WMO : 2008).

オゾン吸収係数は、Komhyrらにより世界準器(NOAA(米国海洋大気庁)のドブソンオゾン分光光度計 Beck#083)の光学系および観測結果を吟味して、決定されたものである (Komhyr *et al.* : 1993). オゾン全量の計算には、全世界の測器でこのオゾン吸収係数が用いられている。

しかし、専門家によるスリット幅等の光学系調整に伴う誤差により、各測器のオゾン吸収係数は異なると考えられる。例えば、S1, S2 スリットの間隔は $0.4 \pm 0.01 \text{ mm}$ となっており、それぞれのスリット間隔には $\pm 2.5\%$ の誤差を許容している。また、S1, S2 スリットの平行性を担保する必要がある。実際には他の光学系調整に伴う誤差も影響され、測器毎に S2 スリットを通過する光の強度分布にわずかな違いを生ずることを避けることができない。このため、オゾン吸収係数の計算に用いる光の強度分布は測器毎に異なっていると考えられる。

具体的に、S2 スリットを通過する光の強度分布について考える。Fig. 2 に A 波長組についての重み関数およびオゾン吸収スペクトル関数を示す。重み関数とは、S1 スリットを通過した光のうち S2 スリットを通過する光の波長別の割合を示し、理想的な光学系であれば A 波長組については 305.5 nm を中心とした 1.8 nm の幅を持つ三角形となる。オゾン吸収スペクトル関数は、オゾン層に吸収される前の太陽光強度に対する波長別の吸収率を表している。測器のオゾン吸収係数はこれらの値を元に計算される。

現在は全ての測器において、世界準器で値付けされたオゾン吸収係数が使用されているが、実際は上記で述べた光学系の調整に伴う誤差により、重み関数の形が変化すると考えられる。

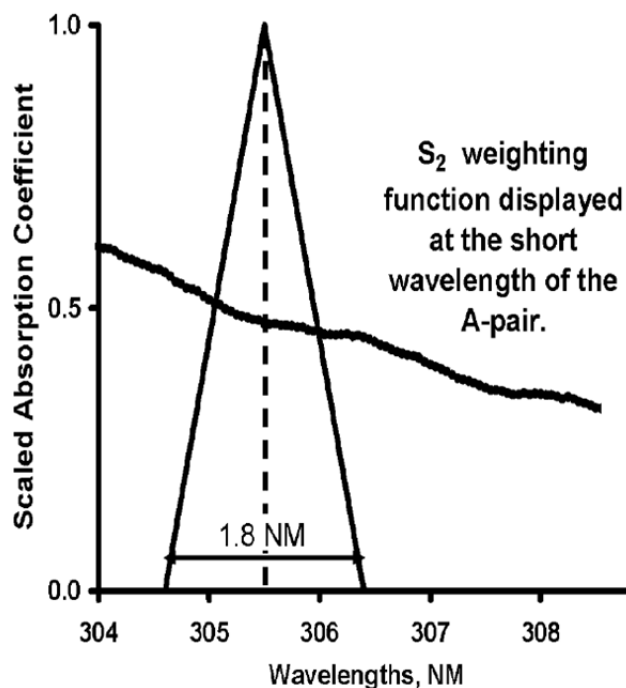


Fig.2 Weighting function for slit S2 and function of the absorption coefficients of ozone (WMO : 2008).

Triangle shows weighting function for slit S2 at the short wavelength of the A-pair and curve shows function of the absorption coefficients of ozone for each wavelength.

The absorption coefficients of ozone can be calculated by integrating the product of weighting function and function of the absorption coefficients with respect to all wavelength.

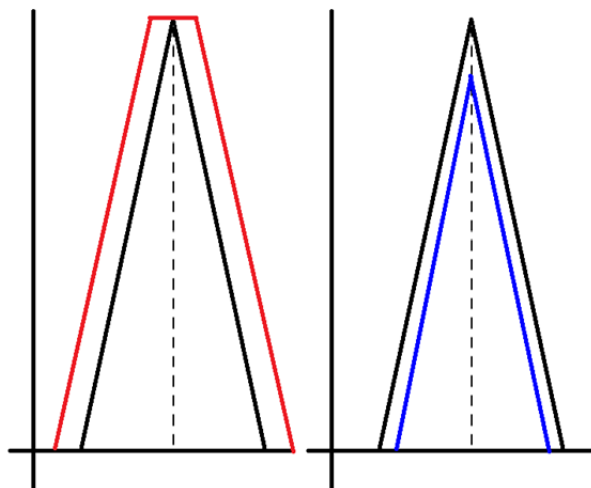


Fig.3 (a) Weighting function for slit S2.

(Left) In case slit S2 is wider than slit S1.

(Right) In case slit S2 is narrower than slit S1.

Weighting function for slit S2 of standard instruments is shown as black triangle. When slit S2 is wider than slit S1, weighting function for slit S2 is shown as red trapezium.

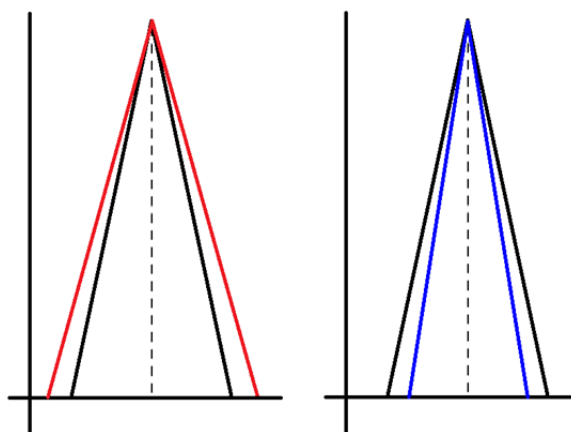


Fig.3 (b) Weighting function for slit S2.

(Left) In case the distance between slit S2 and slit S3 is short.

(Right) In case the distance between slit S2 and slit S3 is long.

Weighting function for slit S2 of standard instrument is shown as black triangle. When the distance between slit S2 and slit S3 is short, weighting function for slit S2 is shown as red triangle.

光学系の調整に伴う誤差が重み関数へ与える影響を Fig. 3 に示した. Fig.3 (a)は, 世界準器と比較して S1 スリットに対する S2 スリットの幅が広い測器と狭い測器についての重み関数, Fig.3 (b)は, S2 スリットと S3 スリットの距離が短い測器と長い測器についての重み関数である.

Fig.3 (a)の左図について具体的に考察する. 世界準器の重み関数は黒線, S2 スリットの幅が広い測器(本節において, 以下比較器とする)では, より広い波長域の光が S2 スリットに入射するため, Fig.3 (a)の左図に示す重み関数(赤線)となる.

オゾン吸収係数は, 重み関数とオゾン吸収スペクトル関数の積の積分と重み関数の積分の比で計算できる.

Fig.3 (a)の左図では, 重み関数(赤線)とオゾン吸収スペクトル関数の積の積分は増加する. 比較器では広い波長域の光が入射するため, S2スリットを通過する光のオゾン吸収量は世界準器より大きいといえる. ただし, オゾン吸収係数は重み関数を積分した値との比になるため, 一概に大きくなるということとはできない.

Fig.3の他, S1スリットとS2スリットの平行性がずれている場合やL1レンズの焦点がずれている場合などの光学系の調整に伴う誤差が考えられる. これらの誤差がわずかつ重なって, 測器毎に異なる重み関数となり, その結果計算されるオゾン吸収係数の値も測器毎に異なってくる.

4. オゾン吸収係数の評価

オゾン吸収係数について, 定量的な考察を行う. オゾン全量の計算式は,

$$X = \frac{N}{\alpha\mu} + C \cdots (1)$$

で表される. ここで,

X : オゾン全量

N : 短波長入射光と長波長入射光の強度比

α : オゾン吸収係数

C : 定数

μ : オゾン層に対する大気路程

である. なお, 導出については気象庁(1991)を参照していただきたい.

X , N , α , C は観測に使用する波長組に依存するが, しばらくは波長組の添え字を省略する. また, これらは本項以降についても同様の物理量を示すものとして使用する.

比較観測時におけるオゾン全量の計算式は, 基準器の添え字を_s, 比較器の添え字を_cとして,

$$X_s = \frac{N_s}{\alpha_s \mu} + C_s$$

$$X_c = \frac{N_c}{\alpha_c \mu} + C_c$$

と表される．なお，これまでは α_s と α_c は同じ値として用いられている．比較観測では，基準器と比較器は同じオゾン量を測定するため， $X_s = X_c$ として変形すると，

$$N_c = \rho N_s + C \cdots (2)$$

$$\text{但し, } \rho = \frac{\alpha_c}{\alpha_s}, \quad C = \mu \alpha_c (C_s - C_c)$$

となる．基準器と比較器で同じオゾン全量を計算するためには，同時刻の観測 N 値間の相関を調べ， ρ ， C を求めればよい．以降 ρ を修正率， $\rho \alpha$ を修正オゾン吸収係数とよぶ．

3. で考察した S2 スリット等の光学系以外の変化(反射ミラー M1 の劣化等)を除けば，測器のスリットやレンズについての光学系の調整をしない限り，修正率 ρ および修正オゾン吸収係数 $\rho \alpha$ は測器に固有の定数として維持される．

5. 現在行われている測器定数の決定方法および結果

現在，測器定数は，校正前の RN 表を用いて，同時刻における基準器と比較器の N 値の差分データの平均値を単純に RN 表に加算したものを新 RN 表としている．

校正前後の計算結果を Fig.4, Fig.5 に示す．使用した比較観測のデータは以下のとおりである．また，結果は D 波長組の観測のみを示した．

- ・ 日時 : 2014 年 8 月 5 日午後
- ・ 実施場所 : 高層気象台
- ・ 基準器 : ドブソンオゾン分光光度計 Beck#116
(国内準器, アジア地区準器)
- ・ 比較器 : ドブソンオゾン分光光度計 Beck#128
(国内移動準器)

Fig.4, Fig.5 のとおり校正後には， N 値の平均の差はなくなった．一方で，校正後でも μ に対する依存性が残っている．このことは，計算に用いる μ の範囲によっては校正結果が異なることを示しているといえる．

なお，比較観測は μ 5.0 を超えるまで実施しているが，定数の検討の際は観測でよく使用される μ 1.1 から 2.5 を用いており，今回も同じ μ の範囲で検討を行った．

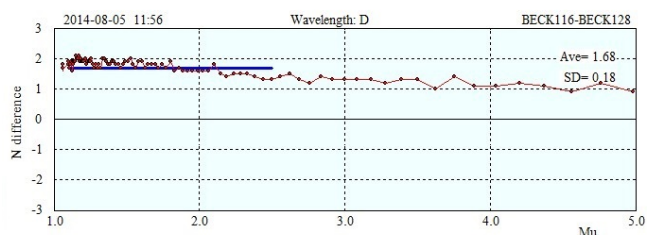


Fig.4 N -value difference before correction.

Vertical axis shows the difference of N -value between the standard instrument and a compared one. Horizontal axis shows the air-mass for ozone layer.

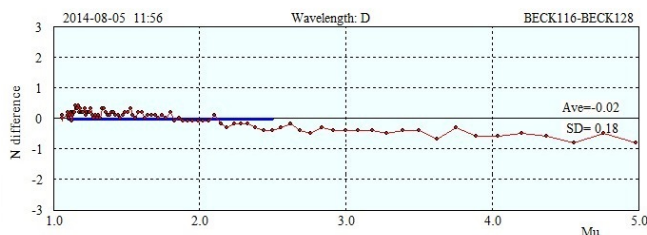


Fig.5 N -value difference after current correction.

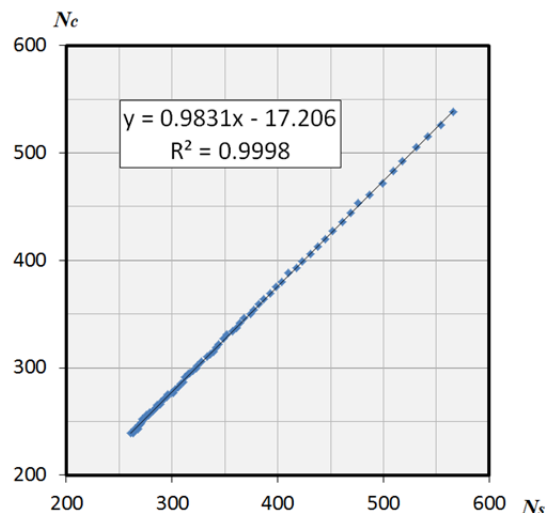


Fig.6 N -value plot of the simultaneous observation of the standard instrument and the compared one.

Vertical axis shows N -value of the compared instrument, and horizontal axis shows N -value of the standard one.

ρ for D-wavelength pairs equals to the coefficient of x (0.9831), and C equals to the constant (-17.206).

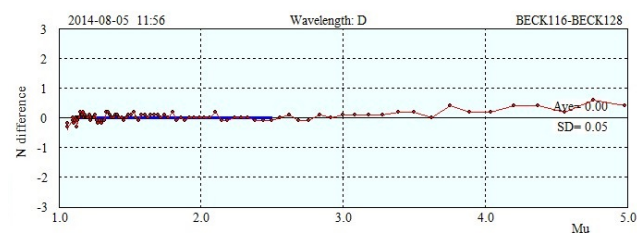


Fig.7 N -value difference after new correction.

6. 修正率 ρ を適用した測器定数の決定方法および結果

次に 4. で扱った修正率 ρ を適用した測器定数の決定方法を説明し、結果を示す。使用したデータは 5. のものを使用し、同じく D 波長組の観測について考察した。

- 同時刻における基準器と比較器の N 値をプロットする。プロットを Fig.6 に示す。
- プロットから(2)式の相関係数 ρ , C を算出する。計算した結果, $\rho=0.9831$ と求まった。このことは、比較器の D 波長組の吸収係数が、基準器に比べて 1.7% 少ないことを示す。

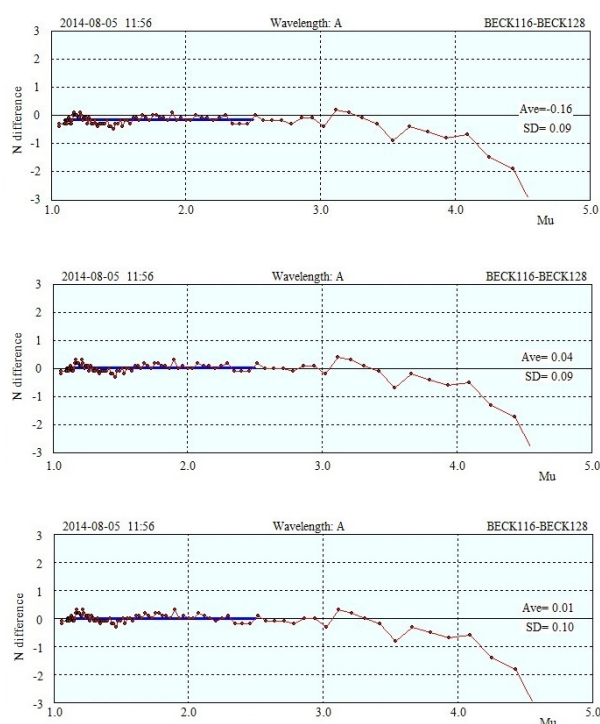


Fig.8 N -value difference for A-wavelength pairs.

(Top) Before correction.

(Middle) After current correction.

(Bottom) After new correction.

N -value difference after new correction is better than the others. But difference is small because data before correction has not the μ -dependence so much.

- ρ , C を適用した計算結果を Fig.7 に示す。これまでの手法では標準偏差が 0.18 であったものが今回の手法により 0.05 に改善した。また, μ に対する依存性もほぼ解消した。

以上のことは、オゾン吸収係数に修正率 ρ を適用することにより、差分データに見られた μ 依存性はほぼ解消し、比較器の N 値は基準器と同様の値となる、すなわち基準器と同様の観測結果が得られることを示している。

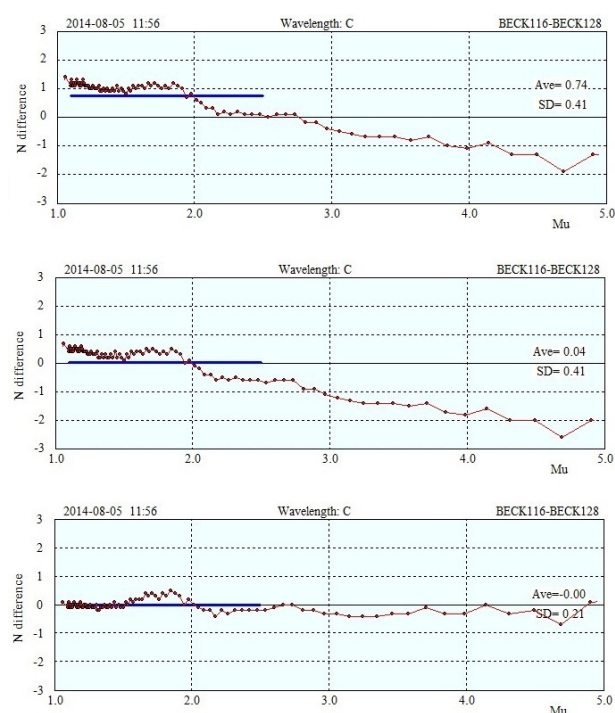


Fig.9 N -value difference for C-wavelength pairs.

(Top) Before correction.

(Middle) After current correction.

(Bottom) After new correction.

N -value difference after new correction is much better than the others. N -value of the compared instrument is smaller than the one of standard instrument from μ 1.5 to 2.0 in all case.

7. 修正率 ρ を適用したいくつかの結果

6. で述べた修正率 ρ を適用して、同様に A 波長組と C 波長組についても計算した。また、A 波長組、C 波長組および D 波長組の N/μ 値を計算し、オゾン全量に現れる傾向について示す。また、求められる AD 波長組によるオゾン全量計算結果についても結果を示す。

7. 1 A 波長組における N 値差分データ

Fig.8 に A 波長組における N 値の差分データを示す。現在行なわれている手法(Middle)と修正率 ρ (1.0006)を適用した手法(Bottom)ではほとんど変わらない。これは、校正前のグラフ(Top)が μ に対する依存性をほとんど持っていなかったことによる。

7. 2 C 波長組における N 値差分データ

Fig.9 に C 波長組における N 値の差分データを示す。C 波長組については、現在行なわれている手法(Middle)に比べて、修正率 ρ (0.9798)を適用した手法(Bottom)では、 μ に対する依存性が大きく改善していることがわかる。なお、 μ 1.5 から 2.0 付近で生じている差分値の変化は A,D 波長組にはみられず、原因はよく解らない。

7. 3 各波長組における N/μ 値差分データ

Fig.10, 11, 12 に A 波長組、C 波長組および D 波長組における N/μ の差分データを示す。 N/μ は 4. の(1)式で示すオゾン全量の計算に用いる値で、各波長におけるオゾン全量の特徴の考察に適している。 N 値の差分データの結果と同様、修正率 ρ を適用した手法(New Correction)が改善しているのがわかる。A 波長組においては、 μ が 1.5 以降の μ 依存性については解消しているが、 μ が 1.1 から 1.2 までの増加傾向および μ が 1.2 から 1.5 までの減少傾向がみられる。一方 D 波長組においては、 μ が 1.1 から 1.2 までは同様に増加傾向がみられるが、 μ 1.2 から 1.5 までは波打つ傾向がみられる。

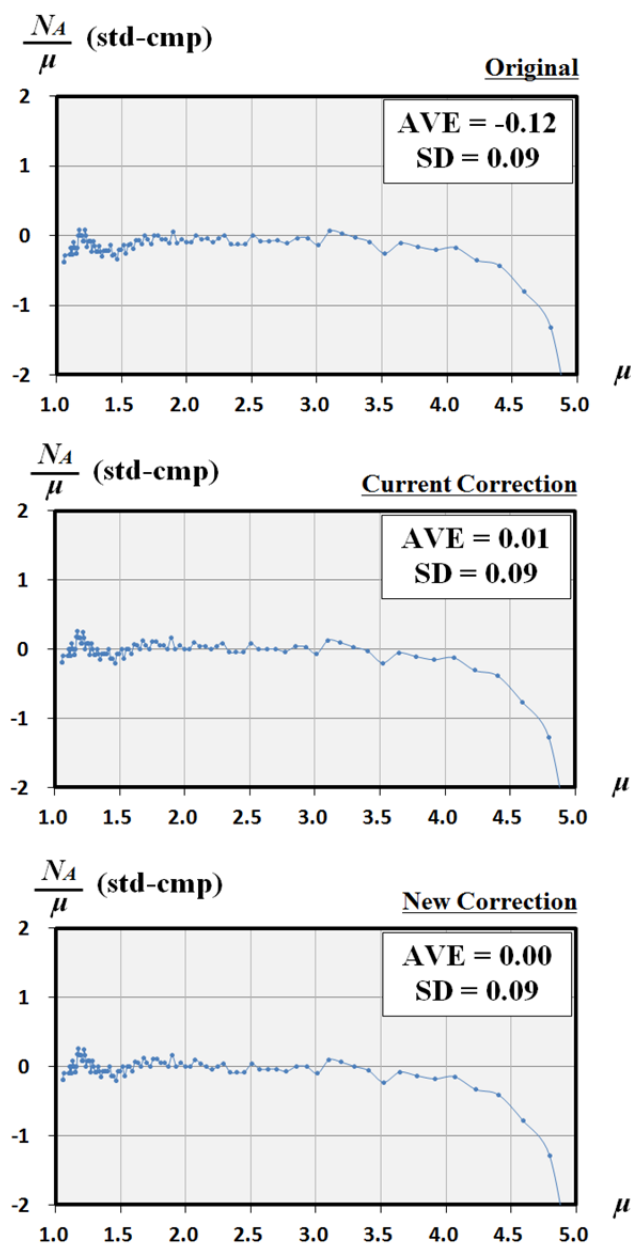


Fig.10 N/μ difference for A-wavelength pairs.

Same as N -value, N -value difference after new correction is better than the others. But a little μ -dependence from μ 1.1 to 1.2 and 1.2 to 1.5 is not improved.

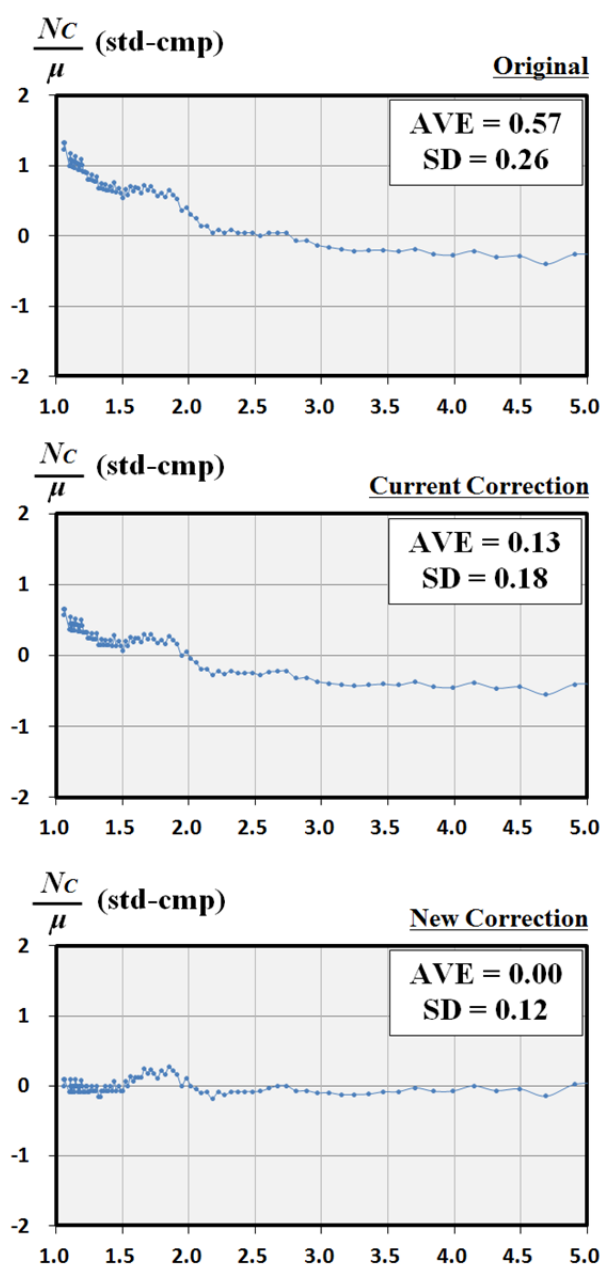


Fig.11 N/μ difference for C-wavelength pairs.

Same as N -value, μ -dependence is almost improved but error from μ 1.5 to 2.0 remains.

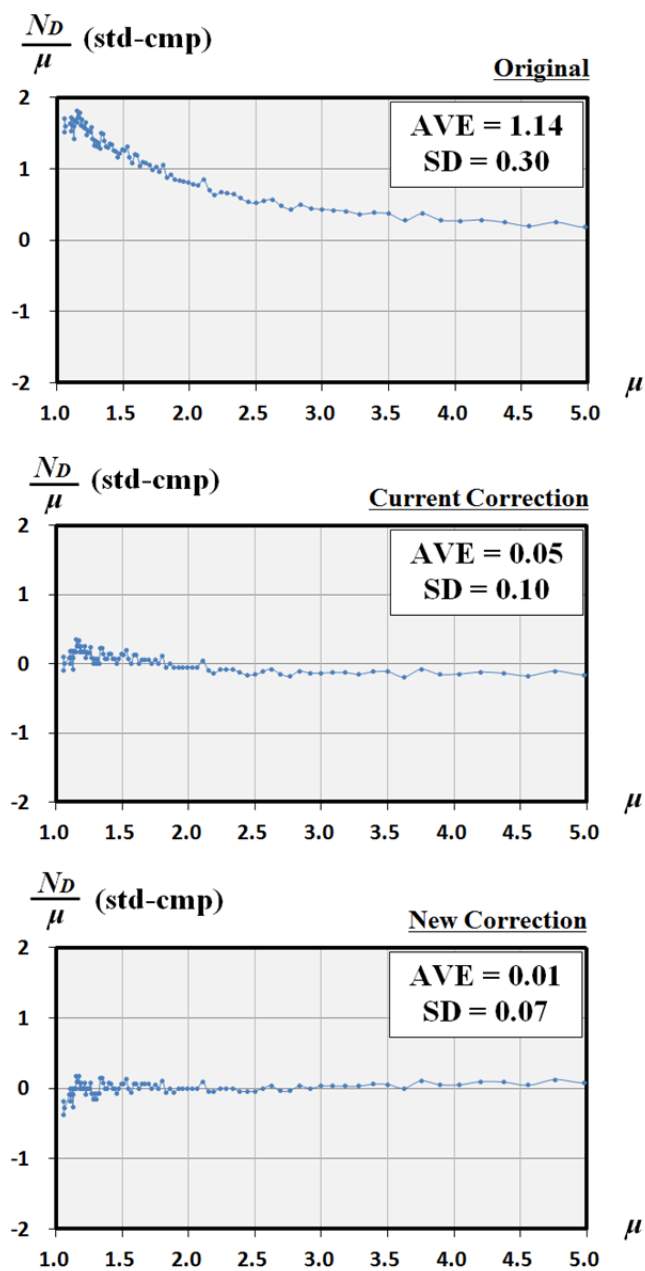


Fig.12 N/μ difference for D-wavelength pairs.

Same as N -value, N -value difference after new correction is better than the others. But a little μ -dependence from μ 1.1 to 1.2 and 1.2 to 1.5 is not improved.

7. 4 各波長組における吸収係数 α と修正率 ρ

Table 1 に、各波長組における吸収係数 α と修正率 ρ の一覧を示す。ここで α は基準器のオゾン吸収係数であるが、今回の計算では、基準器はドブソン分光光度計国内準器(Beck#116)使用しており、正確な数値はここに挙げた世界準器(Beck#083)の吸収係数とは異なるが、今回は Beck#116 も同じ数値であると仮定して、比較器 Beck#128 の修正率 ρ および修正オゾン吸収係数 $\rho\alpha$ の値を示した。なお、 ρ_{AD} は次式で求められる。

$$\rho_{AD} = \frac{\rho\alpha_A - \rho\alpha_D}{\alpha_A - \alpha_D}$$

この値は、オゾン全量の計算には用いられない値であり、測器固有の特性として示される Fig.15 の AD オゾン全量差分データの図に表れる μ 依存性の度合いを数値として示すものである。計算すると、 $\rho_{AD}=1.0049$ となり、比較器は基準器と比べて 0.5% の μ 依存性を持つといえることができる。計算式が示すとおり、比較器の ρ が 1 に近いほど、基準器と同様の観測結果が得られることを示している。

Table 1 Absorption coefficients of ozone and modify rate ρ for each wavelength pairs.

α s are the absorption coefficients used in current calculation and calibration. $\rho\alpha$ s are the modified absorption coefficients, improved error from optical characteristics of Dobson spectrophotometer. ρ s are from the results of N -value plot (e.g. Fig.6 for D-wavelength pairs). Actually ρ_{AD} is not used in calculation, but can be regarded as the indication of μ -dependence.

	α	ρ	$\rho\alpha$
A	1.806	1.0006	1.807
C	0.833	0.9798	0.816
D	0.374	0.9831	0.368
AD	1.432	1.0049	1.439

7. 5 修正率 ρ 適用後の各波長組オゾン全量データ

7. 3 に示した μ 1.5 付近まで残っている依存性について考察するため、Fig.13 に A 波長組、C 波長組および D 波長組で計算した、基準器と比較器それぞれにおけるオゾン全量データを示す。

各波長組とも μ 1.2 付近まで V 字型の変化がみられる。これは、 μ が小さいつまり太陽高度が高い時は、サンディレクターにより導入される太陽光のスポットが細くなるため、すり水晶板による拡散が不均一となり、S1 スリットに入射する光の強度が想定されている一様な強度と異なるためと考えられる。また、 μ 2.5 付近以降にみられるなだらかな減少はエアロゾルの影響と考えられる。

A 波長組については、特に基準器において μ 4.0 以降の減少傾向がみられる。これは、最も波長が短いため強度が弱い波長組である A 波長組では測定限界があり、基準器の測定限界が μ 4.0 付近であることに起因する。一方で、比較器は μ 4.5 付近まで有効とみることができる。また、C 波長組および D 波長組では、基準器、比較器とも明確な測定限界は現れていない。

C 波長組については Fig.9 同様、 μ 1.5 から 2.0 にかけて基準器と比較器に誤差が見られるが、はっきりした原因は Fig.13 から読み取ることができない。

以上の現象による誤差は、修正率 ρ の適用では解消されない。これらは今後の検討としたい。

7. 6 AD 波長組オゾン全量データ

Fig.14 に定常観測に用いる AD 波長組オゾン全量データを示す。 N 値の差分データおよび N/μ の差分データの結果と同様、修正率 ρ を適用した手法(New Correction)が改善しているのがわかる。Fig.10, 11, 12 で述べた μ 依存性については、 μ 1.2 までの増加傾向は解消されてない。これは 7. 5 で述べた μ 1.2 付近での分光器の特性が表れていると考えられる。一方で μ 1.5 までの μ 依存性は、A 波長組と D 波長組を組み合わせることで、多少改善していることがわかる。

7. 7 AD 波長組オゾン全量差分データ

Fig.14 の差分データを Fig.15 に示す。修正率 ρ を適用した手法(New Correction)では、 μ 1.2 から 2.5 の範囲での平均が -0.03DU であり、また標準偏差も 0.77 と小さく、 N 値の差分データおよび N/μ の差分データの結果と同様改善しているのがわかる。Fig.10, 11, 12 で述べた μ 依存性については、7. 6 と同様だが、誤差はオゾン全量換算で $\pm 2DU$ であり、比較観測当日のオゾン全量(280DU)に対して、誤差は 1% 以内である。

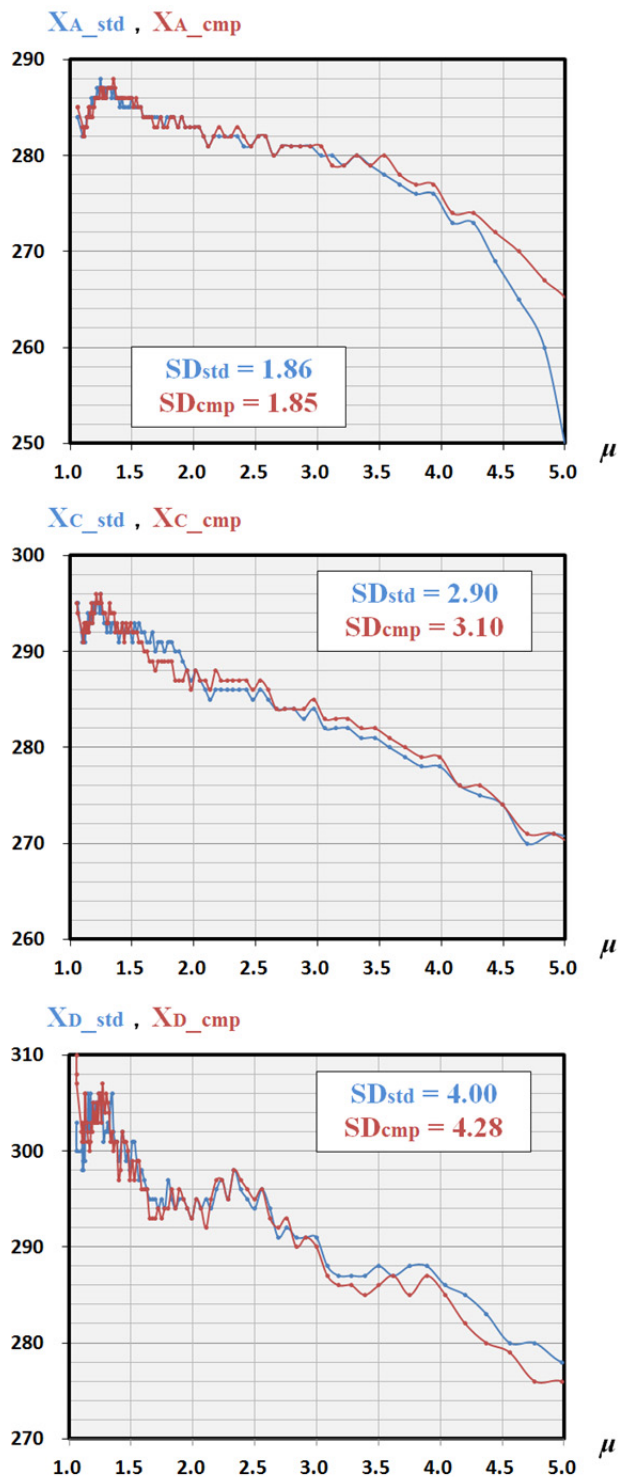


Fig.13 Total amount of ozone for A,C,D-wavelength pairs after new correction.

Total amount of ozone for A-wavelength pairs decrease rapidly after μ 4.0. This is the limit of measurement.

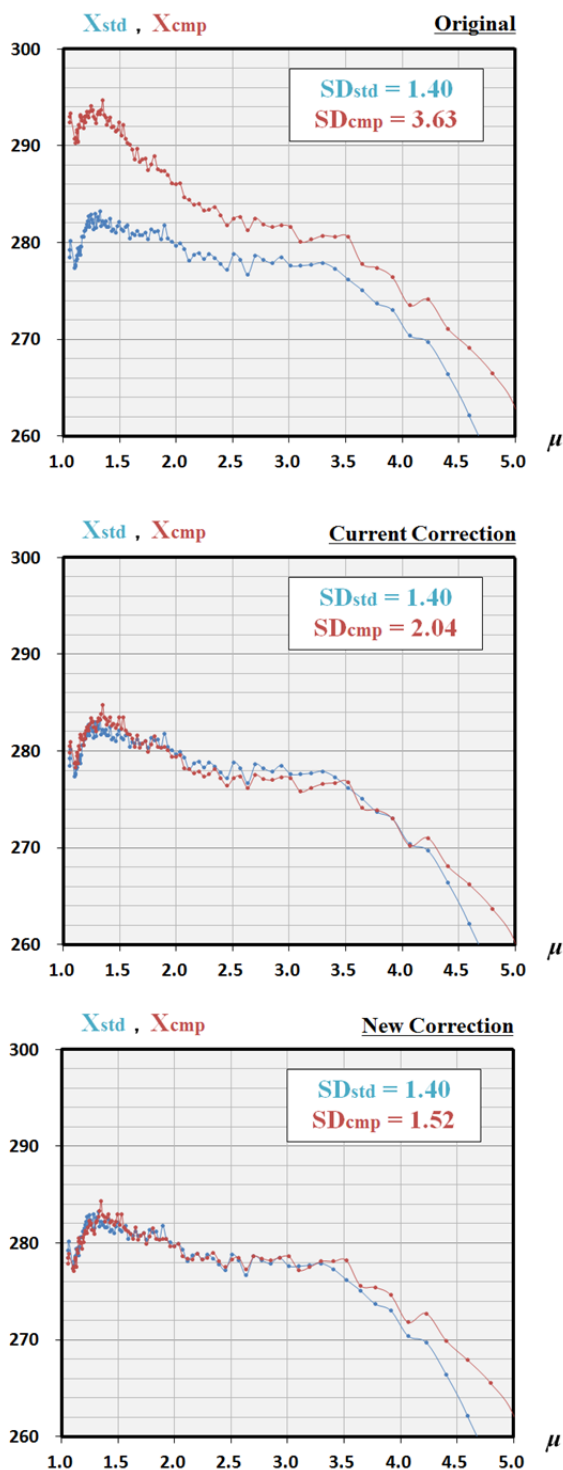


Fig.14 Total amount of ozone for AD-wavelength pairs.

It can be considered that the optical characteristic of Dobson spectrophotometer causes the difference from μ 1.1 to 1.2.

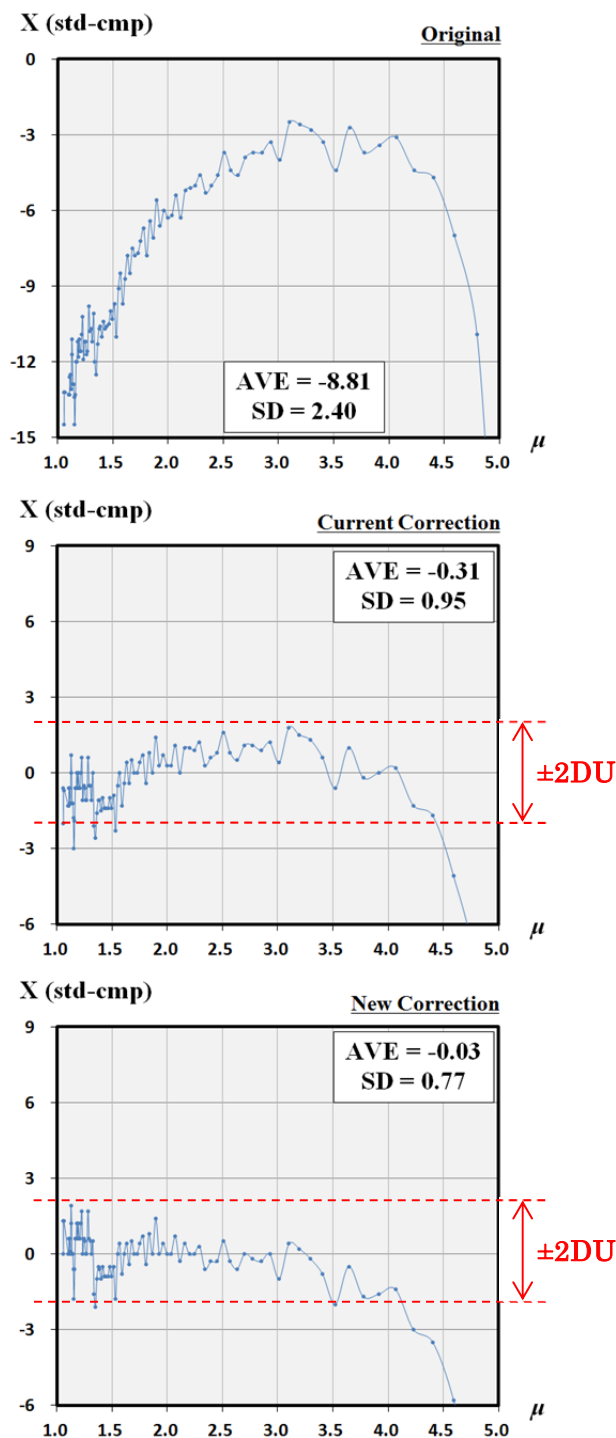


Fig.15 Difference of the total amount of ozone for AD-wavelength pairs.

Difference after new correction is much better than the others. μ -dependence is not improved but error is less than 1% of the average total amount ozone of that day (280DU).

8. まとめ

今回は、比較観測時におけるさまざまな誤差のうち、光学系の調整に伴う誤差の解消を試みた。

光学系の調整に伴う誤差は、各々の測器のオゾン吸収係数の違いとしてみることが出来る。それぞれの測器の光学系の調整に伴って生じるオゾン吸収係数の違いによるオゾン全量値の誤差は、オゾン吸収係数の修正率 ρ を用いることで改善できた。この手法により、基準器と比較器の比較観測結果に表れていた μ 依存性が大きく改善され、比較器でも基準器と同様の観測結果が得られることが分かった。

この修正率は、例えば反射ミラーM1の劣化等の光学系の変化を除けば、測器の光学系の調整を行なう等の変更を行わない限り、測器に固有の定数として保存されと考えられる。

今後は、この手法の定常観測業務への導入について検討していくこととしている。

謝 辞

本稿を草するに際し、数多くの比較観測データの取得のために、高層気象台観測第三課各位には多大な協力を頂いた。ここに厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 気象庁(1970)：オゾン観測指針。気象庁, 121pp.
- 気象庁(1991)：オゾン観測指針 オゾン全量・反転観測編。気象庁, 91pp.
- JMA, WMO (2003)：WMO/GAW Reagional Intercomparison of Dobson Spectrophotometers for Asia (Tsukuba, Japan, 3-20 March 2003). 15pp.
- 宮川幸治(1999)：ボールダーにおける WMO ドブソンオゾン測器相互比較1998。高層気象台彙報, **59**, 29 - 36.
- 宮川幸治・廣瀬保雄・伊藤真人(2002)：マウナロアにおける WMO ドブソンオゾン分光光度計の国際相互比較。高層気象台彙報, **62**, 1 - 6.
- 押木徳明・江崎雄治・居島修(2014)：ボールダーにおける WMO ドブソンオゾン分光光度計の国際相互比較。高層気象台彙報, **72**, 33 - 38.
- 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.
- WMO (2008)：Operations Handbook – Ozone Observation with Dobson Spectrophotometer. *WMO/GAW No.183*, 74pp.