

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

押木 徳明*・江崎 雄治*・居島 修*

WMO/GAW Intercomparison of Dobson Ozone Spectrophotometers in Boulder, USA

Noriaki OSHIKI, Yuji ESAKI and Osamu IJIMA

要旨

WMO ドブソンオゾン分光光度計国際相互比較が2013年8月12日から23日にアメリカ合衆国・ボールダーにある米国海洋大気庁において開催され、アジア地区準器であるドブソン分光光度計 No.116と世界第一準器 No.83との比較観測を実施した。比較観測の目的は、太陽直射光によるオゾン全量観測の較正を行うことであるが、併せて、オゾン鉛直分布観測の改善を目的とした天頂散乱光による比較観測も行われた。太陽直射光による比較観測は8月14日の午前に行われた。No.116の No.83からの差はオゾン全量が300m atm-cm のとき-0.2%であった。これにより、3年前ハワイのマウナロワで決定された測器常数からの変化は無かったことが示された。天頂散乱光を用いたオゾン鉛直分布の比較観測は8月16日、20日の午前に行われた。No.83と No.116の層別オゾン量は、すべての層において±6%以内で一致した。

1. はじめに

世界気象機関(WMO : World Meteorological Organization)は、全球大気監視(GAW : Global Atmosphere Watch)計画の中で、オゾン観測網で使用されるドブソンオゾン分光光度計の観測精度を維持するため、世界第一準器、地区準器、地区内加盟国の測器で構成する較正体系を定めている。米国海洋大気庁(NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration)地球システム調査研究所(ESRL : Earth System Research Laboratory)地球監視部(GMD : Global Monitoring Division)は、世界第一準器を維持管理しており、世界較正センター(WDCC : World Dobson Calibration Centre)に任命されている。WDCCはWMOの勧告(第40回WMO執行理事会)に基づき、少なくとも3年に1度、世界第一準器と地区準器とのドブソンオゾン分光光度計国際相互比較(以下、「国際相互比較」という)を開催している。

気象庁は、WMO第II(アジア)地区較正センターに任命されており、高層気象台は、アジア地区準器 No.116(以下、D116という。DはDobson Ozone Spectrophotometerを、数値は測器番号を示す)の維持管理を担っている。2013年

は、国際相互比較の実施年にあたり、WDCCからの要請を受け、米国コロラド州ボールダーで開催された国際相互比較に高層気象台から参加した。この国際相互比較では、太陽直射光を用いたオゾン全量の比較観測のほか、天頂散乱光を用いたオゾン鉛直分布の比較観測(以下、「反転比較観測」という)を実施した。

本稿では、前回の国際相互比較(2010年6月、米国ハワイ島マウナロア観測所)から、2013年の国際相互比較までの3年間におけるD116の測器の状況及び2013年の国際相互比較での結果を報告する。

なお、本稿で使用するドブソンオゾン分光光度計の各種定数、点検の詳細については、気象庁(1970, 1991)及びWMO(2009)を参照されたい。

2. 参加機関と測器

2013年の国際相互比較は、NOAAのRobert Evans氏らを中心に、2013年8月12日から8月23日にかけて行われた。2013年の国際相互比較に参加した機関及び測器を、表1に示す。2013年の国際相互比較には、日本・気象庁が維持管理するアジア地区準器D116とオーストラリア気象局が維持管理する南西太平洋地区準器D105の2台の地区準器が参加した。

*高層気象台 観測第三課

表1 国際相互比較に参加した機関及び測器

測器	参加国・機関	備考
D083	米国・海洋大気庁	世界第一準器
D065(※1)	米国・海洋大気庁	世界第二準器
D061(※2)	米国・海洋大気庁	ボールダー観測用測器
D105	オーストラリア・オーストラリア気象局	南西太平洋地区準器
D116	日本・気象庁	アジア地区準器

※1 D065 は太陽直射光による比較観測のみ参加

※2 D061 は天頂散乱光による比較観測のみ参加

3. 前回の国際相互比較以降のD116の状態

3.1 D116の管理状態

D116は、前回の国際相互比較以後、2013年の国際相互比較に参加するまでの期間、定期的を実施してきた水銀ランプ点検及び標準ランプ点検により、ほぼ良好に維持されてきた。この項の以下の項目で主な点検結果について述べる。

3.2 水銀ランプ点検結果

水銀ランプ点検は、観測波長組を適切に選択していることを確認するために行う。前回の国際相互比較(2010年6月)から2013年の国際相互比較(2013年9月)までの期間に実施したD116の水銀ランプ点検結果を図1に示す。水銀ランプ点検で測定したQレバーの角度をQobs、点検時の測器温度に応じてQ表から求めたQレバーの角度をQsとして、QobsとQsの差(Qobs-Qs)を点検値として示している。一部に点検合格基準の範囲(±0.3°)を超える点検値がみられたが、前後の点検値については合格基準範囲内であった。殆どの点検値は合格基準の範囲内に入り、測定波長のずれを生じた期間はなかったと判断できる。

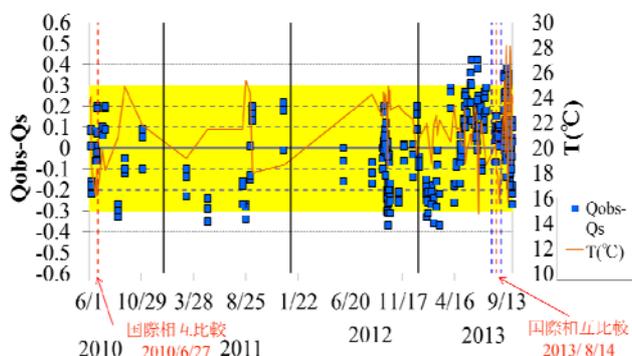


図1 水銀ランプ点検結果 (2010年6月～2013年9月)

横軸：点検日，縦軸(左)：水銀ランプ点検結果(°)，縦軸(右)：点検時の測器温度(°C)，黄色のシェード：点検結果の合格範囲，赤縦点線：2010年と2013年の国際相互比較における点検日，青縦点線：2013年の国際相互比較実施期間

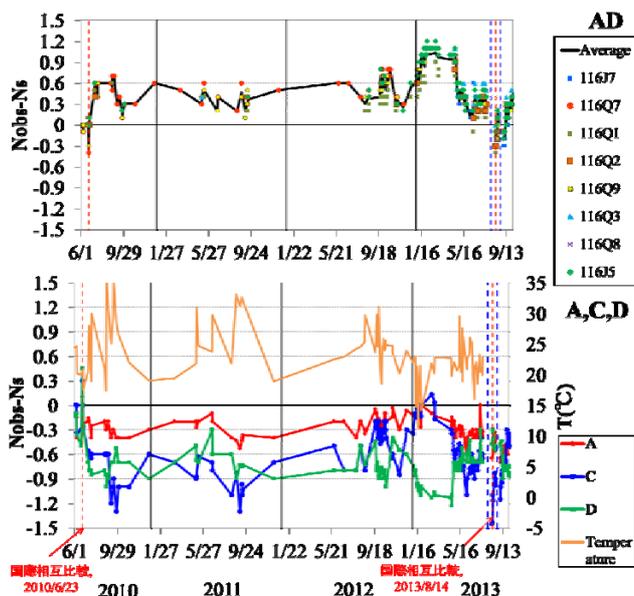


図2 標準ランプ点検結果 (2010年6月～2013年9月)

上図：AD波長組，下図：A,C,D各波長組

横軸：点検日，縦軸(左)：標準ランプ測定値(Nobs)と2010年の国際相互比較で決定した基準値(Ns)の差(Nobs-Ns)，下図縦軸(右)：点検時の測器温度(T(°C))，上図の凡例は標準ランプの名前を示す。下図の凡例は波長組を示す。黒実線：1日の平均値，赤縦点線及び青縦点線：図1と同じ。

3.3 標準ランプ点検結果

標準ランプ点検は、測器常数の監視及び観測値の補正を行うために実施している。3.2と同じ期間に実施したD116の標準ランプ点検結果を、図2に示す。前回の国際相互比較において測定した標準ランプのN値(N値は光の強度比。以下、「Ns」という)を基準とし、それ以降に実施した点検で測定したN値(以下、「Nobs」という)との変化(以下、「Nobs-Ns」という)を点検値として示す。オゾン全量の算出には、A波長組の「Nobs-Ns」とD波長組の「Nobs-Ns」の差(以下、AD波長組の「Nobs-Ns」という)が使用される。

AD波長組の「Nobs-Ns」は、2013年1月まで+0.3～+0.6を推移したが、2013年2月～4月は+1.1と顕著に変化した後、2013年の国際相互比較までは+0.3前後であった。2013年2月～4月の+1.1の変化については現在調査中であるが、短期間で元の状態に戻ったことから、前回の相互比較以降、測器の状態はほぼ良好に維持できていたと判断できる。今後も、引き続き標準ランプ点検を定期的に行い、測器状態を監視する必要がある。

3.4 2ランプ点検結果

2ランプ点検は、光学くさびの濃度勾配に変化が無いことを確認するために行う。2013年の国際相互比較に参加する直前に高層気象台で実施した2ランプ点検結果を図

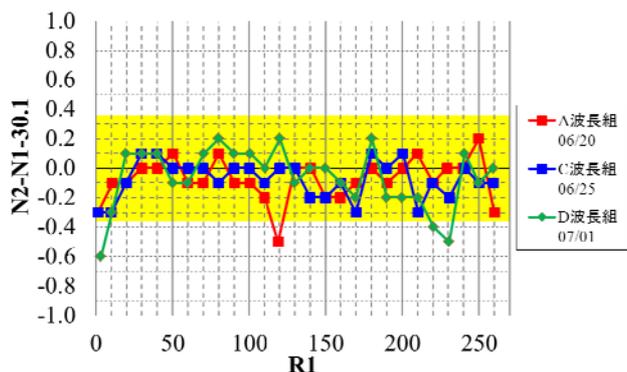


図3 2ランプ点検結果 (2013年6月20日, 25日, 7月1日)
横軸: Rダイヤル値(RI(°)), 縦軸: R値における測定N値(N1)と透過率が0.01倍になる位置のN値(N2)の差から30.1を減じた値。
赤: A波長組の点検結果, 青: C波長組の点検結果, 緑: D波長組の点検結果。黄色のシェード: 点検結果の合格範囲。

3に示す。縦軸は2ランプ点検で検出した濃度勾配とR-N表の差をN値で示したものである。A波長組においてRダイヤル値が120°のとき、点検の合格範囲外となった。この点検値に関しては、付近の測定点は合格範囲内にあり、C波長組、D波長組に大きな変化は見られない。また点検において測定するRダイヤル値の標準偏差が大きいことから、点検に使用したランプの照度が不安定だったと考えられる。このことから、点検時の測定誤差である可能性が高いと考えられる。

D波長組において、Rダイヤル値が0°及び220°、230°のとき、点検の合格範囲外の値となった。これらの点検値についても、A波長組、C波長組の点検結果には現れていない。光学くさびの濃度が高い部分では、弱い光で点検を行うため、誤差が大きくなる。Rダイヤル220°、230°の測定においても誤差の影響が現れた可能性がある。

全体として、光学くさびの汚れを示すパターンは見られず、光学くさびの濃度勾配は、3年間で変化していないことが確認できた。

4. ボールダーにおける測器の状態

4.1 輸送による測器への影響

高層気象台(つくば)からボールダーへの輸送による測器への影響を調べる目的で、S2,S3スリットの波長点検を行った。この点検では、水銀の基線スペクトルの内、312.9nm及び334.2nmの波長を利用する。S2スリットを通る光路について、Q1レバー又はQ2レバーを動かして行う点検(以下、「S2Q1」又は「S2Q2」という)のほか、S3スリットとQ1レバー又はQ2レバーを使用する点検(以下、「S3Q1」又は「S3Q2」という)を行う。点検の結果を表2

表2 水銀ランプ点検結果(2013年8月12日)

点検値の差はS2Q1を基準とした各点検結果の差を示したものである。

スリット Qレバー	波長 (nm)	測器温度 (°C)	点検値 (°)	点検値の 差(°)
S2Q1	312.9	20.8	82.75	-
S2Q2	334.2	20.8	81.95	-0.79
S3Q1	312.9	20.8	82.63	-0.13
S3Q2	334.2	20.8	82.60	-0.15

に示す。

S2Q1とS3Q1の点検結果の差は、-0.13°と小さく、2つのスリットの位置関係は正常に保たれていたことが確認できた。S2Q1とS2Q2の関係については、-0.79°と若干差が大きい、S3Q1、S3Q2は一致していた。この結果から、第一分光部と第二分光の対称性は正常な範囲と考えられる。高層気象台(つくば)からボールダーへの輸送において、D116の光学系のアライメントは良好に保たれたことが確認できた。

4.2 Q表の補正

ボールダーの標高は、高層気象台(つくば)の標高に比べて約1600m高く、気圧は約190hPa低い。このような気圧の低い高所では、水晶プリズムの相対屈折率が変化することが分かっている。ボールダーにおいて、D116を設置した直後に実施した数回の水銀ランプ点検では、Q表から-1.25°のずれが認められた。このため、設置直後の点検結果に基づき、観測に使用する各波長組のQ表を補正して使用した。

4.3 国際相互比較実施期間中の測器の状態

Q表の高度補正後、ボールダーにおいて実施した水銀ランプ点検結果は、すべて点検合格基準の範囲に収まっていた。一方、標準ランプ点検結果には国際相互比較期間中を通じて若干の変化があった。ボールダーにおいて実施した標準ランプ点検結果を図4に示す。C波長組の点検値が次第に変化し、9日間で+0.6程度の変化を示した。A波長組、D波長組の点検値は比較的安定しているが、AD波長組の点検値はおおよそ-0.4~+0.2の範囲で変化した。この原因については特定できなかった。しかし、変化の大きさは2013年2月からの標準ランプ点検結果の変化(+0.8程度)と比較して、特別に大きな変化ではない。このことから、国際相互比較実施期間におけるD116の測器常数は、2013年1月から7月までの期間と同程度に安定していたといえる。

なお、標準ランプ点検は、水銀ランプ点検と異なり高度補正をする必要はない。

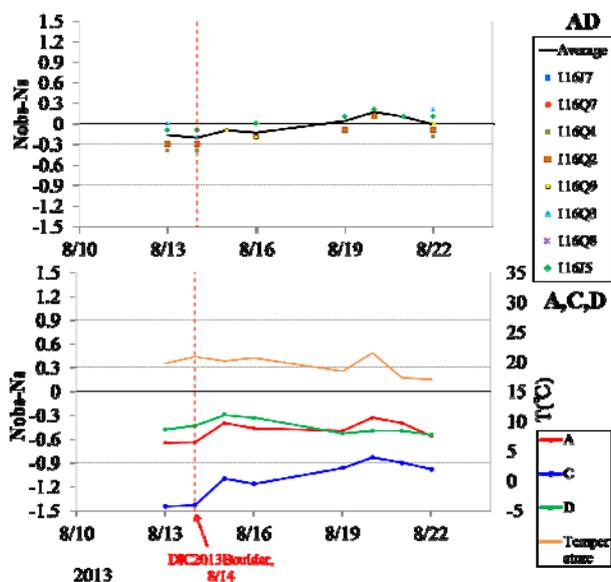


図 4 標準ランプ点検結果(2013年8月13日~22日)

上図：AD波長組，下図：A,C,D各波長組及び測器温度

横軸：点検日，縦軸(左)：標準ランプ測定値(Nobs)と2010年の国際相互比較で決定した基準値(Ns)の差(Nobs-Ns)，下図縦軸(右)：点検時の測器温度(T(°C))，上図の凡例は標準ランプの名前を示す．下図の凡例は波長組及び測器温度を示す．黒実線：1日の平均値，赤縦点線及び青縦点線：図1と同じ．

5. 比較観測の方法

施設の屋上及びテラスに最大5台の測器を置き，太陽直射光又は天頂散乱光による同時観測を実施した。「C波長組」，「D波長組」，「A波長組」の各観測及び「観測準備」を1分毎に切り替えて，この4分を1シリーズとして観測を繰り返した．観測作業については，D105は，すべての操作が手動で行われ，D083及びD065は，Rダイヤルの読み取り以外が手動で行われた．D116は，自動制御システム(宮川：2002，2007)を使用して観測した．

太陽の位置が南中に近くなると，時間の経過に対する大気路程(以下，「 μ 」という)の変化が小さくなることから， μ 1.5未満の時間帯は，手動の作業軽減のため，D083，D065，D105については，1シリーズ毎に観測を休止した．

6. 太陽直射光による比較観測の結果及び評価

6.1 太陽直射光による比較観測の結果

8月14日の太陽直射光による比較観測を， μ 1.1~3.3の範囲で実施した．観測で得られたD083とD116のN値の差(以下，「 $N_{083}-N_{116}$ 」という)を求め，オゾン全量を観測する μ の範囲(μ 1.1~2.5)において平均した．

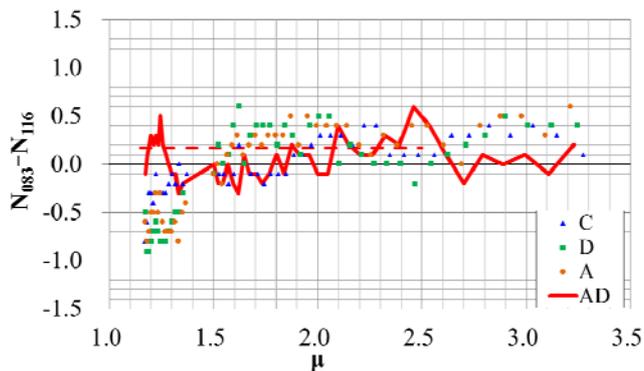


図 5 D116で観測したN値とD083で観測したN値の差

比較観測実施日：2013年8月14日午前

横軸： μ ，縦軸：観測されたN値の差($N_{083}-N_{116}$)，A(赤丸)：A波長組の差，C(青三角)：C波長組の差，D(緑四角)：D波長組の差，AD(赤破線)：AD波長組の差，赤実線：AD波長組 μ 1.1~2.5の平均値

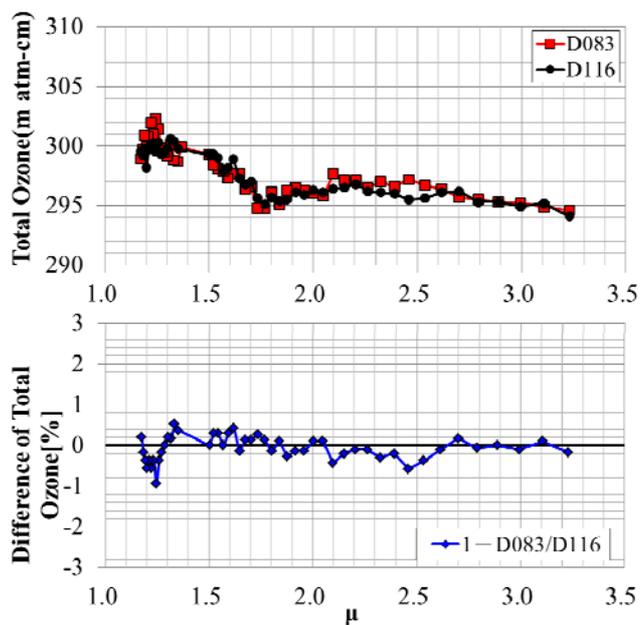


図 6 D116とD083のオゾン全量及びオゾン全量の差

比較観測実施日：2013年8月14日午前

横軸： μ ，縦軸：オゾン全量(m atm-cm)(上図)，観測されたオゾン全量の差($1-D_{116}/D_{083}$)(%) (下図)

実施日：2013年8月14日 午前

基準測器：D083

比較測器：D116

R-N表：前回の国際相互比較で決定したR-N表を使用．

Q表：2013年5月時点のQ表にボールダーの高度を補正して使用．

標準ランプ点検による補正值：

8月14日の比較観測直後の点検結果を使用．

A 波長組: -0.7

C 波長組: -1.4

D 波長組: -0.4

比較結果 : $N_{083}-N_{116}$ (μ 1.1~2.5 の平均)

A 波長組: +0.2

C 波長組: 0.0

D 波長組: 0.0

AD 波長組(A 波長組-D 波長組): +0.2

図 5 に、2013 年 8 月 14 日午前の比較結果($N_{083}-N_{116}$)を示す。各波長組の $N_{083}-N_{116}$ は、 μ 1.1~1.4 では-1.0~0.0、 μ 1.5~2.5 では-0.3~+0.6 であった。オゾン全量を観測する μ の範囲(μ : 1.1~2.5)において、 $N_{083}-N_{116}$ の平均は、A 波長組では+0.2、C 波長組及び D 波長組では 0.0 であった。 μ 1.1~1.4 と μ 1.5~2.5 の $N_{083}-N_{116}$ には、0.5 以上の差がみられたが、オゾン全量の算出に用いる「A 波長組-D 波長組」(AD 波長組)の $N_{083}-N_{116}$ (図 5 赤実線)については、-0.3~+0.6 で、 μ 1.5~2.5 での平均は+0.2 であった。+0.2 の差は、オゾン全量に換算して、-0.6 m atm-cm(オゾン全量 300 m atm-cm : $\mu=1\sim3$)の誤差に相当する。

6.2 太陽直射光による比較観測の評価

D116 と D083 で観測したオゾン全量及びオゾン全量の差を、図 6 に示す。比較を行った μ 1.2~3.2 の範囲において、D116 と D083 のオゾン全量は、1%以内で一致した。前回の国際相互比較以降、D116 が良好な状態で維持管理されたことを確認できた。D083 との AD 波長組における N 値の差(+0.2)は、標準ランプ点検精度の範囲内であり、測器内部の光学系の保守点検は行わなかった。

以上の結果から、D116 の測器定数は変更せず、前回の国際相互比較で決定した値を 3 年後の相互比較観測まで使用することになった。

標準ランプ点検によって決定する D116 の測器定数は、3.3 で述べたとおり、2013 年 1 月以降、短い期間で変化した。測器定数の変化は、標準ランプ点検結果を用いて補正可能であり、引き続き標準ランプ点検を定期的実施し、測器常数を監視する必要がある。

7. 反転比較観測の結果及び評価

7.1 反転比較観測の結果

反転比較観測は、8 月 16 日午前及び 8 月 20 日午前の 2 回実施した。反転比較観測で得られた D116 の N 値と D083 の N 値の差(D116-D083)を、図 7 に示す。なお、各測器の N 値は、8 月 14 日に実施した標準ランプ点検結果を用いて補正した。

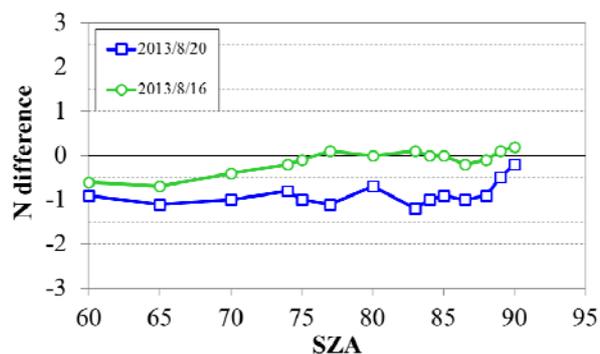


図 7 反転比較観測結果(観測値の差)

縦軸 : D116 と D083 の N 値の差(D083-D116), 横軸 : 太陽天頂角 ($^{\circ}$), (緑丸 : 2013 年 8 月 16 日, 青四角 : 2013 年 8 月 20 日, 赤実線 : 太陽天頂角 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲における N 値の差

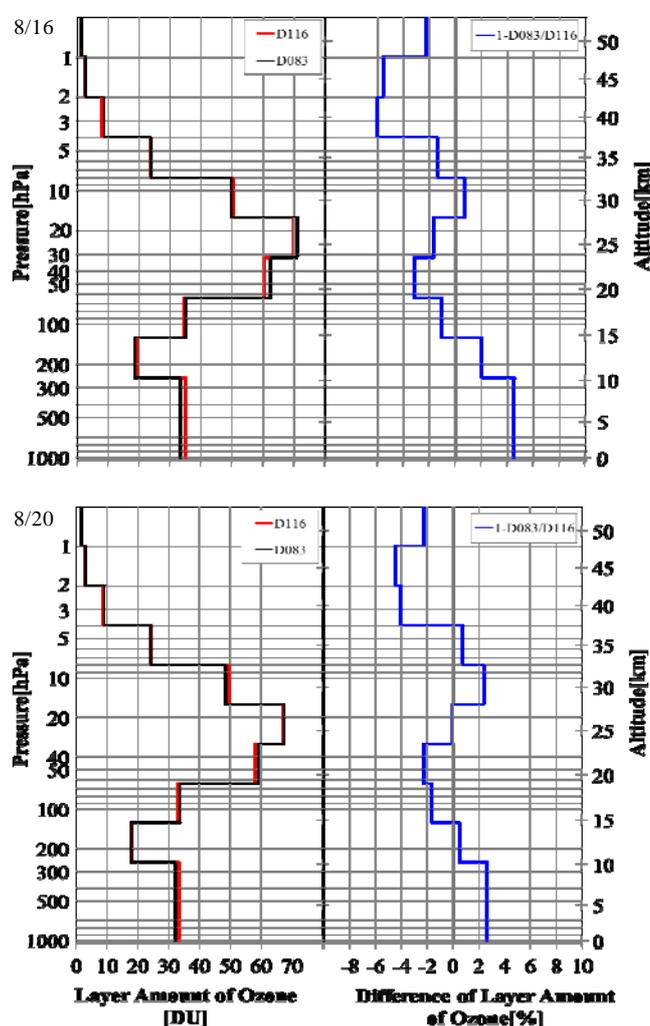


図 8 反転比較観測の結果

比較観測実施日 : 2013 年 8 月 16 日 午前(上図), 2013 年 8 月 20 日 午前(下図)

横軸 : 層別オゾン量(左図), D116 で観測した層別オゾン量と D083 の差(1-D083/D116)(%) (右図). 縦軸 : 気圧(hPa) (左軸), 高度(km) (右軸), 左図の凡例は測器番号を示す。

8月16日の比較観測では、太陽天頂角 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲において、N 値の差は $-0.7 \sim +0.2$ であった。同様に、8月20日では、 $-1.2 \sim -0.2$ であり、両日のN 値の差($N_{083} - N_{116}$)は一致しなかった。また、太陽天頂角が大きくなるほど差が大きくなる傾向があった。比較観測を行った NOAA 庁舎から約 7km 北に位置する Table Mountain におけるサンフォトメータを用いた 340nm におけるエアロゾルの光学的厚さ(AOD : Aerosol Optical Depth)の観測(http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/aerosols.html)は、8月16日では 1.0、8月20日では 0.3 と異なっており、両日のN 値の差の違いは、AOD の違いも原因の一つと考えられる。

過去3回行われた国際相互比較(2001年、2004年、2007年実施)における反転比較観測では、D083とD116のN 値の差は $+0.4$ 未満であった(Miyagawa *et al.*:2009)。2013年の国際相互比較におけるN 値の差は、 $-1.2 \sim +0.2$ となり、過去3回とは異なる結果となった。

7.2 反転比較観測の評価

D083とD116のN 値から算出した層別オゾン量及び2台の測器の層別オゾン量の差($1 - N_{083}/N_{116}$)(%)を図8に示す。層別オゾン量は、UMK04(Petropavlovskikh *et al.*:2005)アルゴリズムを用いて計算した。D083とD116の観測値は、N 値の差としては、違いがみられたが、層別オゾン量を計算した結果は、両日とも $\pm 6\%$ 以内で一致しており、各層における層別オゾン量の違いについても、ほぼ同様の傾向であった。

8. まとめ

2013年8月13日から8月24日にかけて、米国・コロラド州・ボールダーにおいてドブソンオゾン分光光度計国際相互比較が開催され、高層気象台で維持管理するドブソンオゾン分光光度計アジア地区準器D116が参加した。

比較観測の結果、世界準器D083とアジア地区準器D116の差は、オゾン全量値 300m atm-cm に換算して -0.6 m atm-cm であった。前回の国際相互比較(2010年)から今回の国際相互比較までの3年間、アジア地区準器は良好な精度で維持されていたことを確認した。世界準器との差は、標準ランプ点検における合格基準の範囲内であり、内部光学系の調整及び測器定数の変更は行わなかった。

反転比較観測では、世界準器D083とアジア地区準器D116の層別オゾン量は、すべての層で $\pm 6\%$ 以内で一致していた。

謝 辞

滞在中終始お世話頂いた Robert Evans 氏と NOAA の研究者の皆様に心より感謝いたします。また、今回の国際相互比較に際して測器の輸送、出張に関する手続き等でご支援ご協力いただいた本庁及び高層気象台の関係官に感謝いたします。

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.
 宮川幸治(2002): ドブソン分光光度計の新自動制御方式. 高層気象台彙報, **62**, 27 - 44.
 宮川幸治(2007): ドブソン分光光度計の自動化ウィンドウズシステムの高度化. 高層気象台彙報, **67**, 85 - 98.
 Miyagawa, K., Sasaki, T., Nakane, H., Petropavlovskikh, I., Evans, R. (2009): Reevaluation of long-term Umkehr data and ozone profiles at Japanese stations, *J. Geophys. Res.* **114**(D07108), 1 - 24.
 Petropavlovskikh, I., P. K. Bhartia, and J. DeLuisi (2005): New Umkehr ozone profile retrieval algorithm optimized for climatological studies, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16808.
 WMO(2009): Operations Handbook – Ozone Observation with Dobson Spectrophotometer. WMO/GAW No.183, 74pp.