

ブリューワー分光光度計の国際相互比較 (2023 年)

上里 至*

Inter-comparison of Brewer Spectrophotometers in 2023

UESATO Itaru

要旨

気象庁(Japan Meteorological Agency : JMA)は、カナダ環境・気候変動省(Environment and Climate Change Canada : ECCC)において、2023年9月12日から26日の日程で世界気象機関(World Meteorological Organization : WMO)ブリューワー分光光度計の国際相互比較観測を実施した。国際相互比較観測では、測器状態を監視するための各種ランプ点検を行うとともに、波長別紫外域日射とオゾン全量についてECCCが管理する世界準器群との比較観測を実施した。

世界準器群との比較観測の結果、気象庁が管理する国内準器は世界準器に対して、波長別紫外域日射観測による積算紫外線量と紅斑紫外線量は共に-2.1%、オゾン全量は-1.0%の差となり、WMOの要求する観測精度内であることを確認した。オゾン全量については、世界準器の観測値を基準として国内準器のオゾン大気外定数を校正した。

今後は、国際相互比較の結果を気象庁の観測に適用するため、国内準器を基準とした比較観測を行い、高層気象台及び南極昭和基地の運用測器のオゾン大気外定数の校正を実施する。

1. はじめに

ブリューワー分光光度計(以下、ブリューワー計と表記)は、回折格子を使用して太陽紫外線を分光することで、波長別の紫外域日射照度を高精度に測定する測器である。気象庁では、ブリューワー計を使用した波長別紫外域日射観測(波長 290.0 nm ~ 325.0 nm を 0.5 nm ごとに測定)を 1990 年に高層気象台(茨城県つくば市)で開始し(伊藤ほか：1991)、2024 年現在では高層気象台と南極昭和基地で観測を行っている。また、ブリューワー計は特定の波長の紫外線を測定することで、オゾン全量(鉛直大気中存在するオゾンの総量)や層別オゾン量(10 層に分けた鉛直大気各層に存在するオゾン量)の観測も可能である。

気象庁では、ドブソンオゾン分光光度計を使用したオゾン全量観測を 1955 年から、層別オゾン量観測を 1957 年から開始し、高層気象台については 2018 年 2 月に、南極昭和基地については 2022 年 2 月にブリューワー計へ観測測器の変更を行った(高野ほか：2019, 上里ほか：2023)。2024 年現在、高層気象台と昭和基地で両観測を行っている。

ブリューワー計の観測精度は、ランプを使用した検定と比較観測により測器の校正を行うことで維持される。測定波長を決定するための分光定数においては、2年毎に実施する分光定数検定(複数のスペクトルランプの輝線を使用した検定)により、その精度を維持している(伊藤ほか：2003)。同検定ではオゾン全量観測に必要なオゾン吸収係数の校正も行う。

さらに、波長別紫外域日射観測においては、NIST ランプ検定(米国標準技術研究所(National Institute of Standard and Technology)で維持する基準照度が値付けられた 1,000W ハロゲンランプによる検定)により、測定値を紫外線照度に変換する測器感度を 2 年毎に校正することで観測精度を維持している(伊藤：2002)。また、測器感度は、1 カ月に 2 回、外部標準ランプ点検(200W ハロゲンランプによる測定感度の点検)により監視し、感度変化に応じた観測値の補正を行っている(津田：2023)。

¹⁾本稿では、測定値及び観測値の不確かさの把握に加え、基準とするランプ又は基準測器に基づき可能な限り誤差を小さくするための設定及び調整を含む。

*高層気象台 観測第二課

表 1 ブリュウワー計国際相互比較(2023 年)の実施内容と天気

日付	曜日	天気	実施内容	比較した基準測器	備考
9/12	火	雨のち曇り	荷物開梱、室内点検、屋外設置と動作点検	BR#145、BR#190	
9/13	水	曇り	修理、比較観測、外部標準ランプ点検	BR#145、BR#190	絞り装置故障
9/14	木	晴れ	比較観測、データ解析	BR#145、BR#190	
9/15	金	快晴	比較観測、データ解析	BR#145、BR#190	
9/16	土	晴れ	制御PCの自動再起動により自動観測停止	BR#145、BR#190	休日のため入庁不可
9/17	日	晴れ	前日に続き観測停止	BR#145、BR#190	休日のため入庁不可
9/18	月	晴れ一時曇り	外部標準ランプ点検、室内設置、分光定数点検	BR#145、BR#190	
9/19	火	快晴	NISTランプ点検、外部標準ランプ点検、測器保守、屋外設置	BR#145、BR#190	
9/20	水	快晴	比較観測、データ解析	BR#145、BR#190、BR#187	
9/21	木	晴れ一時曇り	比較観測、データ解析、外部標準ランプ点検	BR#145、BR#190、BR#187	
9/22	金	晴れ	比較観測、データ解析	BR#145、BR#190、BR#187	
9/23	土	晴れ時々曇り	自動観測により比較観測を継続	BR#145、BR#190、BR#187	休日のため入庁不可
9/24	日	晴れ時々曇り	自動観測による比較観測を継続	BR#145、BR#190、BR#187	休日のため入庁不可
9/25	月	晴れ	比較観測、データ解析、測器撤収、荷物梱包、ミーティングで速報結果を発表	BR#145、BR#190、BR#187	
9/26	火	晴れ	荷物発送手続き		

オゾン全量観測においては、オゾン吸収係数は前述の分光定数検定により、オゾン大気外定数は気象庁が管理するブリュウワー計の国内準器との比較観測により、2年毎に校正することで観測精度を維持している。なお、国内準器は、世界準器群との比較観測により2年毎に校正する(詳細は第2章に記述)。また、日々自動で実施される内部標準ランプ点検により、オゾン全量観測値の特性の変化を監視しており、特性変化が確認された場合、点検値(R6 値)を用いた観測値の補正を行っている(上里：2012)。

層別オゾン全量観測については、国際的な校正体系が構築されておらず、本国際比較の対象となっていない。

2. WMO の枠組みにおける気象庁のブリュウワー計の国際相互比較について

世界気象機関(World Meteorological Organization : WMO)の枠組みにおける気象庁のブリュウワー計の国際相互比較(以下、国際相互比較と表記)では、カナダ環境・気候変動省(Environment and Climate Change Canada : ECCC)が保有するブリュウワー計の世界準器群と国内準器の比較観測により、波長別紫外域日射の観測精度の確認、オゾン全量観測精度の確認、及びオゾン大気外定数の決定を行う。オゾン全量観測において、世界準器群は、ラングレー法を用いた絶対校正によりオゾン全量観測精度を維持している(Fioletov et al. : 2005, Zhao et al. : 2021)。WMO(2001)では、オゾン全量観測の要求精度を±1%としており、また1年から2年の周期で比較観測による校正をする必要があるとしている。また、WMO(2001)では、波長別紫外域日射観測の要求精度は明示されていないが、良い測器でも5%

程度の不確かさがあると評価されている。気象庁は1994年にボールドー(米国)で実施された国際相互比較に参加して以降、これまでに1997年、2002年、2006年、2010年、2014年、2018年にトロント(カナダ)で国際相互比較を実施している(下道ほか：1995、伊藤ほか：1998、伊藤ほか：2003、伊藤ほか：2007、Ito et al. : 2010、上里ほか：2014、上里ほか：2018)。また、2019年には、欧州ブリュウワー地区校正センター(León-Luis et al. : 2018)がウエルバ(スペイン)において主催した欧州地区比較に参加し、スペイン国立気象局(Agencia Estatal de Meteorología : AEMET)が管理する欧州地区準器とECCCの移動準器との比較観測を実施している(藤原ほか：2020)。

3. 2023 年の国際相互比較の日程と実施内容

2023年の国際相互比較(以下、国際相互比較2023と表記)は、トロント(カナダ)のECCC庁舎において2023年9月12日から26日の日程で実施された。国際相互比較2023の期間中に実施した作業内容、現地の天気、及び比較した世界準器群の測器番号を表1に示す。

国際相互比較2023では、ブリュウワー計国内準器(測器番号：#253)の測器をECCCへ輸送し、ECCC庁舎屋上にて世界準器群(測器番号：#145、#187、#190)との波長別紫外域日射とオゾン全量の比較観測を行った(写真1)。天気は晴れの日が多く、比較観測データを多く取得できた。屋外での比較観測期間中は、外部標準ランプ点検による測器感度の監視も行った(写真2)。

また、輸送による測器の光学特性や測器感度の変化を確認するため、9月18日と19日に、ECCCの暗室に国内



写真1 ECCC 庁舎屋上での Brewer 計の比較観測

準器#253 を運び、分光定数検定、NIST ランプ検定、及び外部標準ランプ点検を実施した。検定は気象庁から持ち込んだ装置を使用し、問題なく行うことができた。また、測器保守として駆動部の清掃、グリスアップ、及び駆動用の設定値の確認を実施し、測器保守の前後で光学特性の変化がないことも確認した。なお、2日目の比較観測時に、絞り装置のモーターに障害が発生したが、モーターの交換により復旧した。



写真2 測器感度を監視する外部標準ランプ点検

4. 実施結果

4.1 分光定数検定、NIST ランプ検定、外部標準ランプ点検の結果

分光定数検定では測定波長とオゾン吸収係数の確認を行った。表2に使用したスペクトルランプとその輝線を示す。検定の結果、測定波長は輸送前の設定値と $\pm 0.005\text{nm}$ の範囲内で一致していることを確認し、またオゾン吸収係数もオゾン全量に換算して0.1%未満の差で一致していることを確認した。

NIST ランプ検定は、ECCC への輸送前、ECCC における国際相互比較2023の期間中、及びECCC から高層気象台への輸送後に実施した。NIST ランプ検定装置は2種類あり、高層気象台での検定には気象庁が開発した検定装置(以下、JMA 型検定装置と表記)を使用し、ECCC での検定にはIOS(International Ozone services)社が開発し輸送が容易な検定装置(以下、IOS 型検定装置と表記)を高層気象台から輸送し使用した(写真3)。なお、IOS 型検定装置はJMA 型検定装置に比べ、測器感度の検定結果が2.2%低くなる。検定結果が異なる原因としては、両検定装置のランプカバーの違いや検定に使用するNIST ランプの持つ不確かさの影響が考えられるが、詳細は調査中である。気象庁では、JMA 型検定装置を標準として使用しているため、IOS 型検定装置の検定結果をJMA 型検定装置に合わせるように補正を行った。図1に国際相互比較2023の直前に高層気象台で実施した検定値(図中の(a))を基準とした測器感度の変化を示す。国際相互比較2023の期間中に実施した検定結果(図中の(b))は-1.1%となり、同じタイミング

表2 分光定数検定に使用したスペクトルランプと輝線

スペクトルランプ	輝線 (nm)
亜鉛	3本 (301.836, 303.578, 328.233)
カドミウム	6本 (308.082, 313.317, 326.105, 340.365, 349.995, *361.151)
水銀	3本 (289.360, 296.728, 334.148)

*361.151nm はオゾン吸収係数の算出には使用しない。



写真3 ECCC 庁舎内暗室での NIST ランプ検定の様子

で実施した外部標準ランプ点検結果でも同様に測器感度の低下を確認した。このため、国際相互比較 2023 における波長別紫外域日射照度の算出に使用する測器感度定数を ECCC で実施した NIST ランプ検定の結果から新たに作成した。

4. 2 波長別紫外域日射の比較結果

波長別紫外域日射の観測精度の確認は、290~325nm の波長別紫外域日射照度、積算紫外線量(290~325nm の波長別照度の積算値)、紅斑紫外線量(290~325nm の波長別照度に人体への影響度を重み付けして積算した値)について、世界準器群のうち、測器感度の校正時期が最も近い#190 との比較観測により実施した。波長別紫外域日射観測は約 1 時間毎に実施し、また比較解析では 3 次スプライン補間により測器間の観測時刻のずれをなくした上で、基準測器#190 との差を算出した。解析には快晴となった 3 日間のデータを使用した。

はじめに、波長別紫外域日射照度について、各測定波長(0.5nm 毎)における基準測器との差の 3 日間平均と標準偏差を図 2 に示す。国内準器#253 は基準測器#190 に対して、全波長の平均で約 2%低く、また 315nm 以上の波長でやや

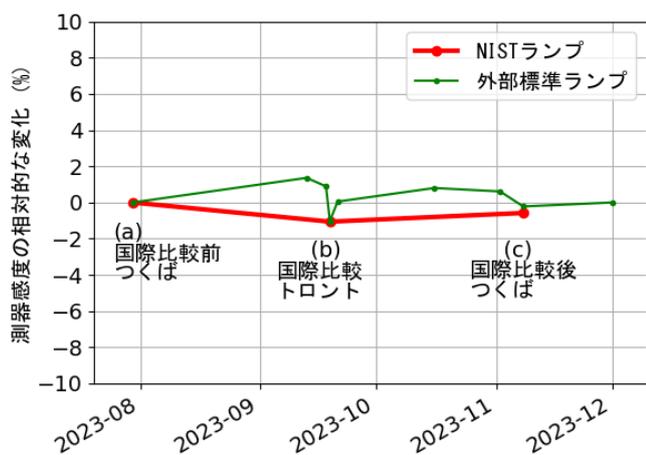


図1 NIST ランプ検定と外部標準ランプ点検による測器感度の変化

つくばで国際比較前に実施した結果(図中の(a))を基準とした相対的な変化(%)を示す。

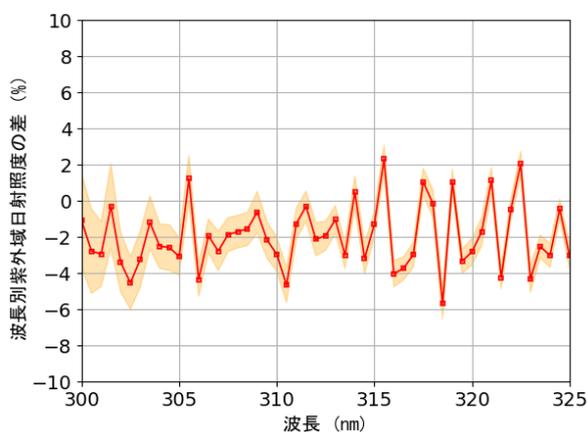


図2 快晴 3 日間における国内準器#253 の波長別紫外域日射照度の基準測器#190 に対する差(%)

300nm から 325nm までの 0.5nm 毎の差の 3 日間の平均値と標準偏差をそれぞれ赤線と橙の網掛けで示す。

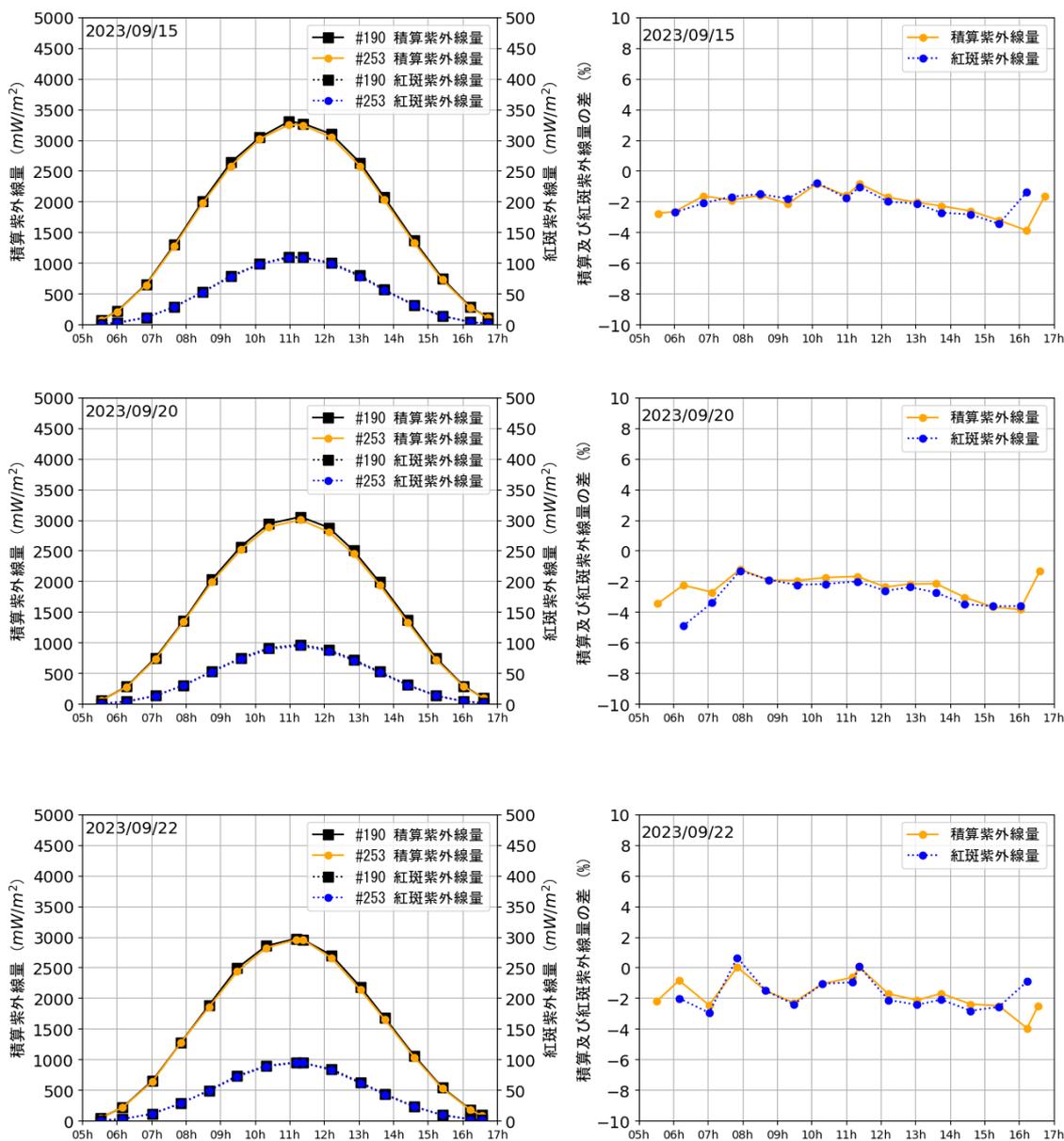


図3 快晴3日間における積算紫外線量と紅斑紫外線量の日変化(左図), 及び基準測器#190に対する国内準器#253の差(%)

積算紫外線量を実線, 紅斑紫外線量を点線で示し, #253は積算紫外線量を黄色で紅斑紫外線量を青色で示し, #190は両紫外線量ともに黒色で示す.

差の変動が大きいという結果となった. 315nm以上の波長におけるやや大きな差の変動は, ハギンズ吸収帯(オゾンにより紫外線を吸収する波長帯で, 地上に到達する太陽紫外線スペクトルの照度が波長に対して上下に振動する)付近の波長において, 測定波長のずれが他の波長よりもやや大きいことに原因があると考えられる. なお, 290~300nmは照度がゼロに近いために評価の対象としなかった.

次に, 積算紫外線量と紅斑紫外線量について, 3日間の

観測値, 及び基準測器との差を図3に示す. 国内準器#253は基準測器#190に対して, 3日間の日平均値は, 積算紫外線量で-1.7~-2.4%(3日間平均で-2.1%), 紅斑紫外線量で-1.6~-2.8%(3日間平均で-2.1%)となり, ともに±5%の範囲内で一致した.

4.3 オゾン全量の比較結果

オゾン全量観測の観測精度の確認は, 直射光オゾン全量観測を対象として, 世界準器群3台を基準とした比較

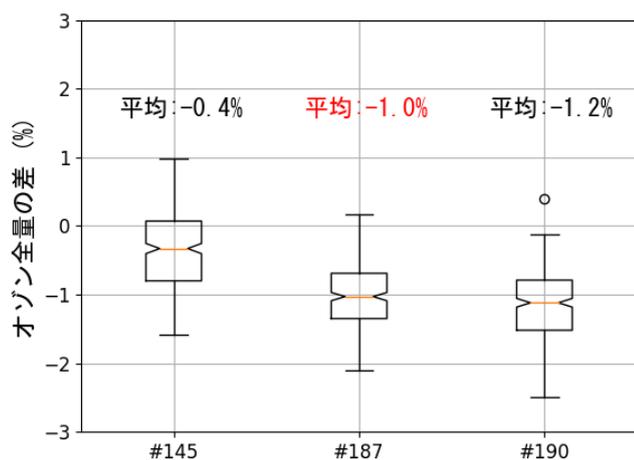


図 4 オゾン全量の世界準器 3 台に対する国内準器#253 の差(%)の箱ひげ図

箱の中央の線は平均値，箱は 25～75%のデータの範囲，ひげは最大値と最小値の範囲を示す。また，○プロットは解析に使用されない外れ値を示す。

観測により実施した。比較には、国内準器と各世界準器の観測時刻の差が3分以内、かつ、GAWがオゾン全量観測において推奨している相対大気路程(天頂方向を1としたときの、太陽光がオゾン層を通過する相対的な長さ)である範囲 1.3～3.5 のデータを用いた。比較観測期間中に得られたデータセットは、世界準器#145 に対して 431 セット、世界準器#187 に対して 305 セット、世界準器#190 に対して 321 セットであった。

国内準器#253 と世界準器群 3 台のオゾン全量の差を図 4 に箱ひげ図で示す。国内準器#253 は、世界準器群 3 台に対して平均-1.2～-0.4%となった。直前にスペインのイザーニャで絶対校正が行われた世界準器#187 をオゾン全量観測値の基準測器とした場合、差の平均は-1.0%で WMO の要求精度±1%の範囲内で一致した。

また、比較結果を基に、世界準器#187 を基準として国内準器#253 のオゾン大気外定数を校正した。図 5 に基準測器#187 に対するオゾン全量の差と相対大気路程との相関を、校正前後について示す。校正前のオゾン全量は基準測器に比べて 1%程度少なく、また、相対大気路程に対する依存性を持っていたが、校正後は相対大気路程に対する依存性はなくなり、良く一致することを確認した。

5. まとめと今後の課題

WMO ブリュウワー分光光度計の国際相互比較 2023 に参加し、国内準器#253 の波長別紫外域日射観測値の確認、並びにオゾン全量観測値の確認及びオゾン大気外定数校正を実施した。

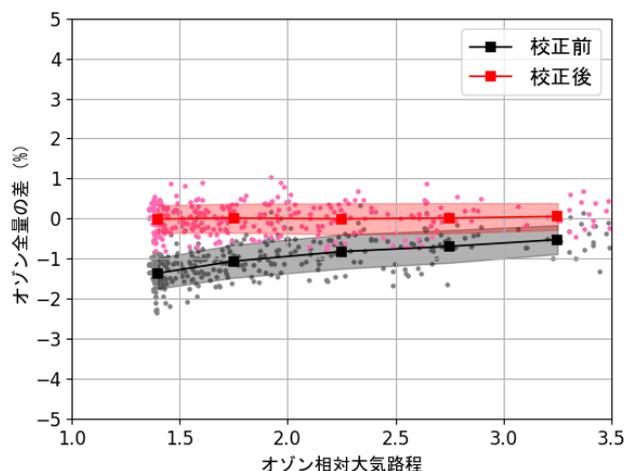


図 5 オゾン大気外定数の校正前後における、オゾン全量の基準測器#187 に対する国内準器の差(%)と相対大気路程との相関図

校正前の観測値による差を黒色、校正後の観測値による差を赤色で示す。直線と四角プロットは、相対大気路程 0.5 毎の平均値で、網掛けは同範囲における標準偏差を示す。

波長別紫外域日射観測値については、国内準器#253 は基準測器#190 に対して約 2%低いことを確認した。この差の要因としては、ECCC と気象庁の NIST ランプ検定装置の差や、検定に使用する NIST ランプの持つ不確かさの影響が考えられる。NIST ランプ検定装置及びランプの持つ不確かさの把握については、今後の調査課題である。

オゾン全量観測値については、国内準器#253 は基準測器#187 に対して GAW の要求精度である±1%の範囲内で一致していることを確認するとともに、比較結果を基にオゾン大気外定数を校正した。

国内準器#253 を国内へ輸送した後に測器の状態と観測値を確認し、国際相互比較 2023 で校正した測器定数を維持していることを確認した。今後は、国際相互比較の結果を気象庁の観測に適用するため、国内準器を基準測器とした比較観測を行い、高層気象台及び南極昭和基地の運用測器のオゾン大気外定数の校正を行う。

謝 辞

国際相互比較 2023 へ参加にあたり、Sum Chi 博士をはじめとする ECCC の職員の方々には、荷物の搬出入や測器の設置等、現地での作業において大変ご協力を頂いた。また、本庁総務部企画課国際室の皆様、本庁大気海洋部環境・海洋気象課オゾン層観測係の皆様には、出張の手続きにあたり大変お世話になった。これらの方々に厚く御礼申し上げる。

引用文献

- Fioletov, V. E., Kerr, J. B., McElroy, C. T., Wardle, D. I., Savastiouk, V., and Grajnar, T. S. (2005) : The Brewer reference triad. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20805, <https://doi.org/10.1029/2005GL024244>, 2005.
- 藤原宏章・上里至・津田元気・高野松美 (2020): スペイン・ウエルバにおける WMO ヨーロッパ地区ブリューワー分光光度計相互比較(2019). 高層気象台彙報, **77**, 1 - 11.
- 伊藤真人・下道正則・能登美之 (1998): カナダ大気環境庁 (AES)における波長紫外域日射計の検定試験と測器相互比較. 高層気象台彙報, **58**, 1 - 10.
- 伊藤真人 (2002): 新型 NIST ランプ検定装置の開発と紫外域日射観測装置(ブリューワー分光光度計)の高度角・方位角特性. 高層気象台彙報, **62**, 53 - 66.
- 伊藤真人・宮川幸治 (2003): カナダ MSC における波長別紫外域日射観測装置の国際測器相互比較 2002 年. 高層気象台彙報, **63**, 1 - 12.
- 伊藤真人・V. Savastiouk・M. Brohart (2003): ブリュー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.
- 伊藤真人・T. Grajnar・M. Brohart・V. Savastiouk・K. Lamb (2007): カナダ MSC におけるブリューワー分光光度計の国際測器相互比較 2006 年と新型検定装置の精度. 高層気象台彙報, **67**, 39 - 52.
- Ito M., T. Grajnar, and M. Brohart and V. Savastiouk (2011) : Intercomparison of Brewer Spectrophotometers between Meteorological Service of Canada and Japan Meteorological Agency at Toronto, Canada in 2010. *Jour. of Aerological Observatory*, **69**, 33 - 40.
- Ito M., Uesato I., Noto Y., Ijima O., Shimizu S., Takita M., Shimodaira H. and Ishitsuka H. (2014) : Absolute Calibration for Brewer Spectrophotometers and Total Ozone/UV Radiation at Norikura on the Northern Japanese Alps. *Jour. of Aerological Observatory*, **72**, 45 - 55.
- 伊藤朋之・上野丈夫・梶原良一・下道正則・上窪哲郎・伊藤真人・小林正人 (1991): 地上到達紫外線量の監視技術の開発. 研究時報, **43**, 5.
- León - Luis, S. F., Redondas, A., Carreño, V., López - Solano, J., Berjón, A., Hernández - Cruz, B., and Santana - Díaz, D. (2018) : Internal consistency of the Regional Brewer Calibration Centre for Europe triad during the period 2005 - 2016. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 4059 - 4072, <https://doi.org/10.5194/amt-11-4059-2018>.
- 下道正則・伊藤真人 (1995): 波長別紫外域日射計のボーダー国際相互比較. 高層気象台彙報, **55**, 11 - 18.
- 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.
- 津田元気・上里至 (2023): ブリューワー分光光度計用の旧型及び新型外部標準ランプ点検装置(UV Stability Kit)の特性調査. 高層気象台彙報, **78**, 63 - 68.
- 上里至 (2012) : ブリューワー分光光度計(MKII)で観測した O₃ 観測値および SO₂ 観測値の標準ランプ点検結果を考慮した補正プログラムの開発. 高層気象台彙報, **70**, 43 - 50.
- 上里至・清水悟・居島修・伊藤真人 (2015): カナダ国トロントにおけるブリューワー分光光度計の国際相互比較 2014. 高層気象台彙報, **73**, 55 - 62.
- 上里至・中野辰美・高野松美・藤原宏章・滝沢厚詩 (2020): WMO ブリューワー分光光度計の国際相互比較 2018 への参加. 測候時報, **87**, 63 - 82.
- 上里至・上野圭介・津田元気 (2023): 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. 高層気象台彙報, **79**, 1 - 11.
- WMO (2001) : Global atmosphere watch measurements guide No.143. *WMO TD*, **No.1073**, 17pp.
- Zhao, X., Fioletov, V., Brohart, M., Savastiouk, V., Abboud, I., Ogyu, A., Davies, J., Sit, R., Lee, S. C., Cede, A., Tiefengraber, M. and Müller, M. (2021) : The world Brewer reference triad - updated performance assessment and new double triad. *Atmos. Meas. Tech.*, **14**, 2261 - 2283, <https://doi.org/10.5194/amt-14-2261-2021>.