

# ブリューワー分光光度計の国際相互比較 (2025 年)

上里 至\*

## Inter-comparison of Brewer Spectrophotometers in 2025

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、2025年9月11日から22日の日程で世界気象機関(World Meteorological Organization : WMO) が実施したブリューワー分光光度計の国際相互比較に参加した。気象庁では、オゾン全量観測については概ね2年ごとに、波長別紫外域日射観測については概ね4年ごとにECCCが管理するブリューワー分光光度計の世界基準器群と相互比較を行っている。今回の国際相互比較では、2023年に両観測の相互比較を実施していることから、オゾン全量観測のみを対象とした。

オゾン大気外定数を校正する前の世界準器とのオゾン全量の相互比較結果では、気象庁の国内準器の観測値は世界準器に対して-0.5%の差であり、WMOが要求する観測精度の範囲内で維持できていたことを確認した。気象庁の国内準器は、精密な動作を必要とする分光器部に不調を抱えていたが、本相互比較の期間中に分光器部に関する保守を実施したうえで、保守に伴い変化したオゾン観測用定数を複数の点検結果を基に校正した。これにより、国内準器のオゾン大気外定数はより高い精度となり、国内準器のオゾン全量観測値は世界準器と0.1%未満で一致した。

今後は、今回の国際相互比較の結果を気象庁の観測に適用するため、国内準器を基準に相互比較を行い、高層気象台及び南極昭和基地で使用する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、オゾン全量(鉛直大気に存在するオゾンの総量)及び層別オゾン量(10 層に分けた鉛直大気の各層に存在するオゾン量)を観測する全自動測器である(Kerr et al. : 1985, Kerr et al. : 1995)。ブリューワー計は1970年後半にプロトタイプが開発され、1980年代に商業的に入手することができるようになったことで、世界で広く使用されるようになった。気象庁では1990年に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)を高層気象台(茨城県つくば市)で開始した(伊藤ほか, 1991)。また、2018年2月に、1955年から観測を行ってきたドブソン分光光度計の後継機として、高層気象台でオゾン観測を開始した(高野ほか : 2019, 上里ほか : 2023)。2026年3月現在、高層

気象台と南極昭和基地において、ブリューワー計を用いた波長別紫外域日射観測とオゾン観測の両観測が行われている。

世界気象機関(World Meteorological Organization : WMO)の枠組みとして構築されているオゾン全量観測ネットワークにおいて、ドブソン分光光度計とブリューワー計は、各測器の世界準器を頂点とした校正体系によって、観測ネットワーク内で均質なオゾン全量観測値を維持している。ブリューワー計については、カナダ環境・気候変動省(Environment and Climate Change Canada : ECCC)が保有する3台のブリューワー計が世界準器群となっており、ECCCは高いレベルで観測精度を維持するため、ラングレー法を用いた絶対検定を定期的の実施している(Fioletov et al. : 2005, Zhao et al. : 2021)。

WMOの全球大気監視観測計画(WMO : 2001)では、オゾン全量観測の要求精度を基準器に対して $\pm 1\%$ 以内としており、1年から2年の周期での測器校正を推奨してい

---

\*高層気象台 観測第二課

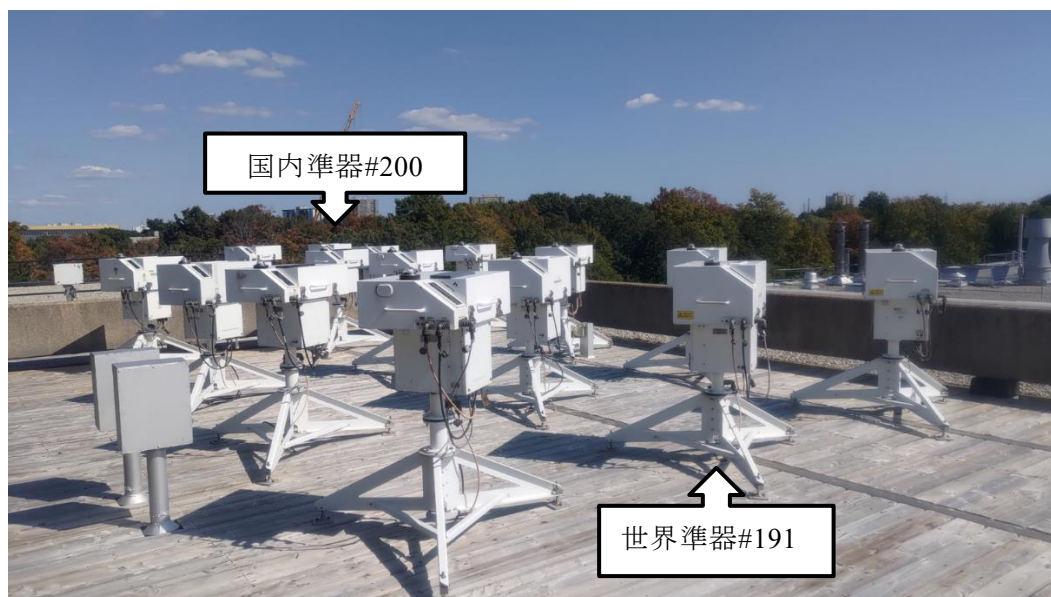


写真 1 ECCC 庁舎屋上でのブリューワー計の相互比較

る。波長別紫外域日射観測については要求精度を明示していないが、精度が良い測器でも 5%程度の不確かさがあると評価されている(気象庁では概ね 4 年ごとに世界準器との相互比較により観測値の確認を行っており、最近 10 年程度(正確には 2014 年以降)の比較結果では-2%~+1%の範囲で一致)。

気象庁は 1994 年にボールダー(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、2023 年にトロント(カナダ)で国際相互比較に参加した(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：2015, 上里ほか：2020, 上里：2025)。また、2019 年には、欧州ブリュー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及び ECCC の移動基準器との相互比較を行った(藤原ほか：2020)。

ブリューワー計の観測精度は、基準器との相互比較の他にランプを使用した点検による測器の校正<sup>1)</sup>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 年ごと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おり(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。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)。

波長別紫外域日射観測においては、NIST ランプ(米国標準技術研究所(National Institute of Standard and Technology))で維持する基準照度により値付けられた 1,000W ハロゲンランプ)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 年ごと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 か月に 2 回、外部標準ランプ(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(津田ほか：2023)。

## 2. 2025 年の国際相互比較の日程と実施内容

2025 年の国際相互比較(以下、国際相互比較 2025 と表記)は、気象庁の国内準器#200 を世界準器群のあるカナダ国トロントの ECCC に輸送し、2025 年 9 月 11 日から 22 日の日程で実施された。写真 1 は、ECCC 庁舎屋上における相互比較の様子である。国際相互比較 2025 の期間中に実施した作業内容や現地の天気等を表 1 に示す。なお、本相互比較は 2 年ごとに実施するオゾン全量観測の校正のみが目的であったため、4 年ごとに実施する波長別紫外域日射観測は行っていない。

国際相互比較 2025 では、オゾン全量観測値の精度を確認するための初期比較を実施した後、測器を屋内の暗室に運び、測器保守、分光定数検定及び外部標準ランプ点検

<sup>1)</sup>本稿では、測定値及び観測値の不確かさの把握に加え、基準とするランプまた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。

表 1 ブリュウワー計国際相互比較(2025 年)の実施内容と天気

| 日付   | 曜日 | 天気      | 実施内容                                 | 比較観測 | 備考                    |
|------|----|---------|--------------------------------------|------|-----------------------|
| 9/11 | 木  | 晴れ      | 荷物開梱、国内準器を屋外へ設置、動作確認                 | 初期比較 |                       |
| 9/12 | 金  | 晴れ      | 世界準器との比較観測                           |      |                       |
| 9/13 | 土  | 曇り      | 世界準器との比較観測                           |      |                       |
| 9/14 | 日  | 晴れ      | 世界準器との比較観測                           |      |                       |
| 9/15 | 月  | 晴れ      | 測器保守（分光器のモーター交換、光軸確認、清掃、グリスアップ、機器調整） | 最終比較 |                       |
| 9/16 | 火  | 晴れ      | 分光定数点検、外部標準ランプ点検<br>屋外へ設置            |      |                       |
| 9/17 | 水  | 晴れ      | Sun scan点検                           |      |                       |
| 9/18 | 木  | 晴れ時々くもり | Sun scan点検、世界準器との比較観測                |      | 測定波長の変更<br>オゾン吸収係数の変更 |
| 9/19 | 金  | 晴れ時々くもり | 世界準器との比較観測                           |      |                       |
| 9/20 | 土  | 晴れ      | 世界準器との比較観測                           |      |                       |
| 9/21 | 日  | 晴れ      | 世界準器との比較観測                           |      |                       |
| 9/22 | 月  | 雨       | 国内準器の撤収、梱包、発送準備                      |      |                       |

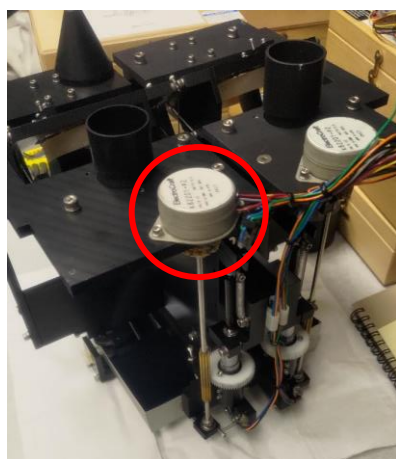


写真 2 取り外した分光器部  
(赤丸は交換したステッピングモーター)

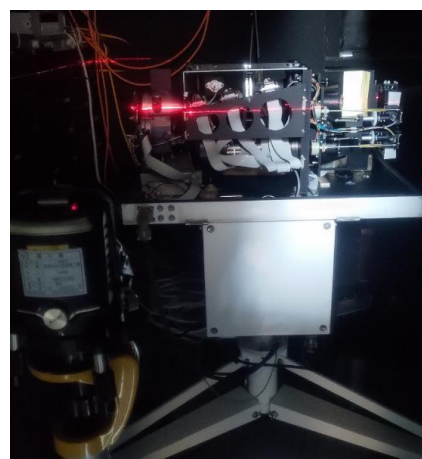


写真 3 レーザー墨出器による分光器取り外し前後の光軸確認(実際には部屋を真っ暗にして実施)

を実施した。その後、屋外に設置して測定スペクトルの適切な組み合わせを決定する Sun scan 点検(上里ほか: 2020)を行った後、世界準器を基準にオゾン大気外定数を校正する最終比較を実施した。国内準器#200 は、国際相互比較 2025 の期間中は正常に動作し、また期間中は晴れの日が多かったため、初期比較と最終比較において、十分な相互比較データを取得することができた。

### 3. 測器保守と各種定数点検

#### 3. 1 測器保守

ブリュウワー計国内準器#200 は、2025 年 3 月に分光器部の部品の劣化により動作不良となり、修理により復旧はしたものの長期間の運用で再発する恐れがあった。当

該部品の交換には分光器部を取り外す必要があり、その場合は測器の光学特性が大きく変化する可能性があった。そのため、光学特性が変化してもすぐに必要に応じた定数校正ができるよう、国際相互比較 2025 に合わせ(具体的には、初期比較を行った後)部品交換を実施した。写真 2 は、部品交換のために測器本体から取り外した分光器部で、写真赤丸のステッピングモーターが交換の対象である。今回、新品のステッピングモーターに交換することにより、長期的な測器の安定性を確保することができた。分光器部の取り外し前後では、できるだけ元の位置に分光器部を設置できるよう、レーザー墨出器を用いた光軸の確認を行った(写真 3)。

表 2 Sun scan 点検結果から算出した各スリットで測定する紫外線スペクトルの中心波長の変化及びオゾン吸収係数の変化

|       | スリット 1    | スリット 2    | スリット 3    | スリット 4    | スリット 5    | オゾン<br>吸収係数 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 測器保守前 | 306.321nm | 310.075nm | 313.527nm | 316.830nm | 320.032nm | 0.3352      |
| 測器保守後 | 306.292nm | 310.047nm | 313.500nm | 316.803nm | 320.005nm | 0.3399      |

### 3. 2 分光定数検定の結果

測器保守後に実施した分光定数検定では、測定波長とオゾン吸収係数の確認を行った。検定の結果、測定波長は短い波長域では 0.01nm 以内で一致したが、345nm より長波長では、測定波長が大きく変化した(図 1)。なお、350nm で段差があるのは測定するスリットの切り替えによるものである。分光定数検定では、オゾン吸収断面積と測定するスリット関数の畳み込みからオゾン吸収係数を算出した(上里ほか：2023)。オゾン吸収係数は、測定する複数の紫外線スペクトルの波長にも依存するため、後述の Sun scan 点検の結果と共に記載する。

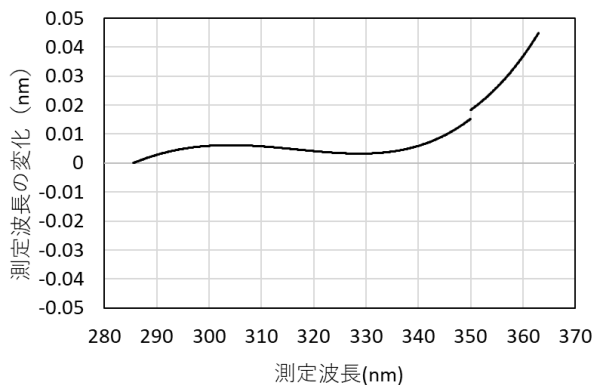


図 1 分光定数検定による測定波長の変化

### 3. 3 Sun scan 点検

室内での測器保守とランプ点検を終了し、測器を屋外に設置した後、オゾン観測で使用する測定スペクトルの適切な組み合わせを決定する Sun scan 点検を実施した。測定スペクトルの組み合わせは、回折格子の回転角によって変化する。Sun scan 点検では、太陽直射光を用いて、回折格子の回転角を僅かにずらしながらオゾン全量の測定を行う(上里ほか：2020)。Sun scan 点検は日の出から日の入りまでの測定値を必要とするが、9 月 17 日に 1 日を通して快晴となり、高品質な点検値を取得することができた。点検の結果、適切な測定スペクトルの組み合わせは、表 2 のように変化した。これにより前述のオゾン吸収係数も同表のとおりとなった。オゾン吸収係数の変化をオゾ

ン全量に換算すると約 1.4%となる。

## 4. オゾン全量の比較と校正

### 4. 1 オゾン全量観測について

太陽からの直達紫外線スペクトル強度は、大気により減衰して地上に到達する。この原理は Beer-Lambert の法則として説明でき、ブリュウワー計におけるオゾン全量の算出は式(1)で表される。なお、ブリュウワー計は 4 つの波長の紫外線スペクトル強度  $I$  を利用することで二酸化硫黄による吸収とエアロゾルによる散乱の成分を無視できるため、式(1)では省略している。また、相対大気路程は、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のだが、オゾンと空気分子等の微小粒子(レイリー散乱が生じる)は高度分布が違ふことから、 $\mu_{O3}$  と  $\mu_R$  は僅かに異なる値となる。

$$X = \frac{\sum w_i \log I_0(\lambda_i) - \sum w_i \log I(\lambda_i) - \sum w_i \beta(\lambda_i) \mu_R}{\sum w_i \alpha(\lambda_i) \mu_{O3}} \quad (1)$$

$X$  : 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

$\alpha$  : オゾン吸収係数

$\beta$  : レイリー散乱係数

$\mu_{O3}$  : オゾン相対大気路程

$\mu_R$  : レイリー散乱相対大気路程

$\lambda_i$  : スペクトル波長

$w_i$  : スペクトル波長別の重み係数

式(1)において、オゾン吸収係数やレイリー散乱係数は室内での分光定数検定により算出可能(レイリー散乱係数は測器ごとの差が小さいため、全ての測器で固定値を使用している)だが、大気外紫外線スペクトル強度  $I_0$  は、測器ごとの測定値(地上スペクトル強度  $I$ )の特性を考慮する必要があるため、理論的な値をそのまま使用することはで

きない。そのため、大気外での紫外線スペクトル強度  $I_0$  は、高地の大気が澄んだ環境におけるラングレー法を用いた絶対検定により、オゾン大気外定数として校正するのが通常であり (Zhao et al. : 2023)、世界準器等はこの方法で定数校正されている。一方、ラングレー法によって校正された測器を基準として、オゾン全量の相互比較から被校正測器のオゾン大気外定数を校正することも可能である。世界準器または欧州地区準器以外の測器は、この相互比較によりオゾン大気外定数の校正が行われている。国際相互比較 2025 では、絶対検定された世界準器#191 を基準として、国内準器#200 のオゾン大気外定数を校正する前のオゾン全量観測精度の確認(4.2 初期比較)とオゾン大気外定数の校正(4.3 最終比較)を実施した。

#### 4.2 初期比較

9月11日～14日にかけて、校正前のオゾン全量の観測精度を確認するための初期比較を実施した。両者のオゾン全量観測値は、測器間の観測時刻の差が3分以内、且つブリュワー計標準操作マニュアル(Environment Canada : 2008)で推奨されているオゾン相対大気路程が 3.5 以下のデータを使用し、111 個の比較データセットを作成した。

図2に世界準器#191を基準として国内準器#200のオゾン全量観測値の相対的な差を、オゾン相対大気路程に対して示した。初期比較の結果、国内準器#200のオゾン全量観測値は世界準器#191に対して平均-0.5%で、WMOの要求精度 $\pm 1\%$ の範囲で一致することを確認し、また、オゾン相対大気路程の変化に対しても大きな依存性がないことを確認した。なお、オゾン相対大気路程に対する依存性はオゾン全量の季節性バイアスとなり得るため、オゾン全量の確認、及びオゾン大気外定数の校正において重要な要素である。

#### 4.3 最終比較

3章の測器保守と定数校正を実施後、9月18日～21日にかけて、国内準器#200のオゾン大気外定数を校正するための最終比較を実施した。使用する観測値は初期比較と同じ条件として、198個の比較データセットを作成した。図3に、オゾン大気外定数校正前と校正後の世界準器#191を基準とした国内準器#200のオゾン全量観測値の相対的な差を、図2と同様に示す。校正前の国内準器#200のオゾン全量観測値は世界準器#191に対して平均-1.9%で、また、オゾン相対大気路程に対する依存性を持っていた。校正後は差の平均が0.1%未満となり、また、オゾン相対大気路程に対する依存性も解消し、世界準器のオゾン全量観測値と高い精度で一致することとなった。

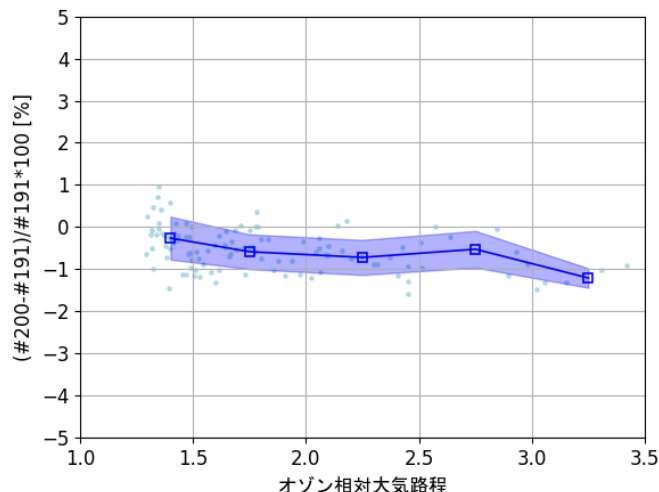


図2 初期比較における世界準器#191に対する国内準器#200のオゾン全量の相対的な差

横軸はオゾン相対大気路程、縦軸はオゾン全量の差を示す。直線及び網掛け部分はそれぞれ相対大気路程の区間毎の平均値及び標準偏差 $\pm 1$ の範囲を示す。

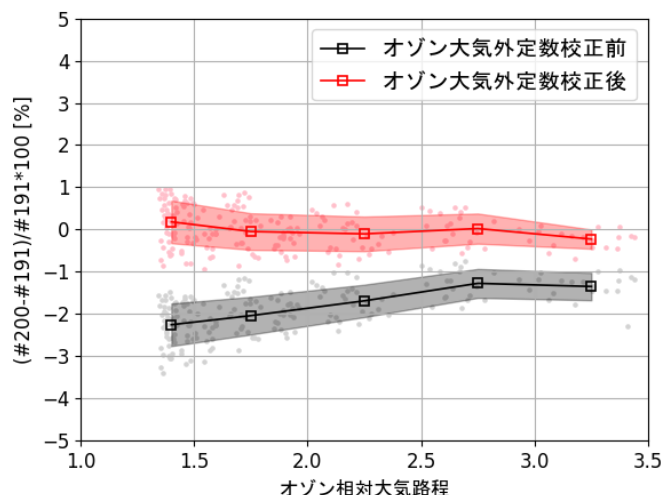


図3 最終比較における世界準器#191に対する国内準器#200のオゾン全量の相対的な差

横軸、縦軸、直線及び網掛け部分は図2に同じ。

#### 5. まとめと今後

WMOブリュワー分光光度計の国際相互比較 2025に参加し、世界準器#191との相互比較によって国内準器#200の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。また、期間中、測器の分光器部の保守を行うことにより長期的な測器の安定性を確保するとともに、保守作業によって変化した測器定数も期間中の点検値を基に正確に校正した。

オゾン全量観測値については、国内準器#200 は今回の校正前も基準測器#191 に対して GAW の要求精度である  $\pm 1\%$  の範囲内で一致していた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することで校正後は世界準器#191 に対して差が 0.1%未満と高い精度で一致することを確認した。

今後は、国際相互比較 2025 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相互比較を行い、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 2025 への参加にあたり、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

- Environment Canada (2008) : STANDARD OPERATING PROCEDURES MANUAL FOR THE BREWER SPECTROPHOTOMETER, [https://woudc.org/archive/Documentation/SOP\\_Documents/brewerspectrophotometer\\_sop-june2008.pdf](https://woudc.org/archive/Documentation/SOP_Documents/brewerspectrophotometer_sop-june2008.pdf) (2026 年 3 月 4 日閲覧)
- 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ウ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)における波長別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(ブリュウワー分光光度計)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.

伊藤真人・T. Grajnar・M. Brohart・V. Savastiouk・K. Lamb (2007): カナダ MSC におけるブリュウ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制度. 高層気象台彙報, **67**, 39 - 52.

Ito, M, T. Grajnar, and M. Brohart (2011) : Intercomparison of Brewer Spectrophotometers between MSC and JMA at Toronto, Canada in 2006, and Accuracy of MSC, IOS and JMA Systems of NIST Lamp Calibration. *Jour. of Aerological Observatory*, **69**, 33 - 40.

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.

Kerr, J., McElroy, C., Wardle, D., Olafson, R., and Evans, W. (1985) : The automated Brewer spectrophotometer, *Atmospheric Ozone, Springer*, 396 - 401, [https://doi.org/10.1007/978-94-009-5313-0\\_80](https://doi.org/10.1007/978-94-009-5313-0_80).

Kerr, J. and McElroy, C. T. (1995) : Total ozone measurements made with the Brewer ozone spectrophotometer during STOIC 1989, *JGR*, **Vol. 100**, 9225 - 9230, <https://doi.org/10.1029/94JD02147>.

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ラダー国際相互比較. 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): ブリュウ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): ブリュウワー分光光度計(MKII)で観測した O<sub>3</sub> 観測値および SO<sub>2</sub> 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ウ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 ブリュウ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ウ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.
- 上里至 (2025) : ブリュウワー分光光度計の国際相互比較  
(2023). 高層気象台彙報, **80**, 1 - 7.
- 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>.
- Zhao, X., Fioletov, V., Redondas, A., Gröbner, J., Egli, L.,  
Zelinger, F., López-Solano, J., Arroyo, A. B., Kerr, J., Barras,  
E. M., Smit, H., Brohart, M., Sit, R., Ogyu, A., Abboud I. and  
Lee, S. C. (2023) : The site-specified primary calibration  
conditions for the Brewer spectrophotometer, *Atmos. Meas.  
Tech.*, **16**, 2273 - 2295, [https://doi.org/10.5194/amt-16-2273-](https://doi.org/10.5194/amt-16-2273-2023)  
2023.