

ブリュワー分光光度計(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

上里 至*

Development of a Correction Program that Considers Results of Standard Lamp Test for O₃ and SO₂ Observation Values of Brewer Spectrophotometer(MKⅡ)

Itaru UESATO

要旨

ブリュワー分光光度計(MKⅡ)は、測器内部のカットオフフィルターの特性により、O₃ 観測値および SO₂ 観測値を標準ランプ点検値から補正する必要がある。これまで、その補正は南鳥島の観測値のみ実施してきたが、他の観測地点の観測値の補正も行う可能性があり、その観測データは膨大になるため、補正作業を簡単に誰でもできるプログラムを開発した。補正方法は、過去に南鳥島で行われた方法を踏襲したが、使用する標準ランプ点検値の選別方法を一部改良している。

今回の補正プログラムは、直射光観測のみの補正を行うプログラムであり、天頂光観測についてはおこなっていない。また、SO₂ は準器との比較によりさらに観測値を補正する必要がある。今後は、今回作成したプログラムにそれらの処理を追加していく必要がある。

1. はじめに

ブリュワー分光光度計(Brewer Spectrophotometer：以下 Brewer と略記)は、全天光および直射光波長別紫外域日射観測の他、O₃(オゾン)全量観測および SO₂(二酸化硫黄)全量観測、また上空のオゾン鉛直プロファイルを導く O₃ 反転観測を行う観測器である。気象庁では 1990 年 1 月 1 日より館野(高層気象台)において、波長別紫外域日射観測が開始され(伊藤ほか：1991)、2012 年 1 月 1 日現在では館野、札幌、那覇、南極昭和基地において波長別紫外域日射観測が行われている。また、波長別紫外域日射観測に毎時並行して O₃ 全量観測と SO₂ 全量観測も行われている。なお、鹿児島においても同様の観測が行われていたが、2005 年に観測が終了している。その他、南鳥島においては 1994 年 1 月より O₃ 全量観測と SO₂ 全量観測および O₃ 反転観測が開始されている。

Brewer による観測は、開始当初は 1 つの回折格子を使用したエバート分光型の Brewer MKⅡ(以下 MKⅡ と略記)を使用していたが、南極昭和基地で 2001 年 2 月から他の

地点では 2002 年 1 月から 2 つの回折格子を使用した Brewer MKⅢ(以下 MKⅢ と略記)を使用している。MKⅡ は、紫外域波長よりも長波長側の光、回折 1 次光が測器感部に入射するのを防ぐためカットオフフィルター使用しているが、そのフィルターが湿度による影響を受けやすいことなどから使用する環境に依存した感度変化を持っている。MKⅢ は、2 つの回折格子を使用した二重分光により回折 1 次光がほとんど除去されるため、カットオフフィルターを使用しておらず、測器感度は MKⅡ に比べ安定している(伊藤・宮川：2001)。なお、Brewer の測器感度の変化を監視するため内部標準ランプ点検、外部標準ランプ点検、NIST ランプ点検を実施しており、その内、内部標準ランプ点検((Internal) Standard Lamp 点検：以下 SL 点検と呼称)は O₃ 観測および SO₂ 観測に関わる O₃ 二重比および SO₂ 二重比を監視するため、1 日 4 回毎日行われる点検である。

能登・伊藤(1998)によると、Brewer による O₃ 全量観測および SO₂ 全量観測を行っている南鳥島において、MKⅡ で観測を行っている期間で、SL 点検結果から O₃ 二重比などが大きく変動し、不安定な状態となっていること

*高層気象台 観測第三課

があった。そこで、SL 点検値を使用した O3 観測値の補正を行い、それが有効であることを確認した。この調査結果をもとに、南鳥島で MKII を使用して観測された O3 観測値と SO2 観測値は、SL 点検値を用いた補正が行われている。しかし、前述のように Brewer での O3 観測は、館野、札幌、那覇、南極昭和基地、また鹿児島においても観測が行われているが、その補正については行われていない。

現在南鳥島で行われている補正方法は、EXCEL を使用し、データセット作成から再計算まで手作業で行う部分が多い。これを全ての MKII で観測された O3 観測値および SO2 観測値を補正するとなると従来の手段では作業が膨大になる。また、新しい担当者がその作業を習熟する事にも時間を要する。そこで、簡単に誰でも補正作業を行うことのできるプログラムを開発した。その概要およびプログラムの使用マニュアルとしての内容も含めてここに記す。なお、MKIII は測器感度が安定しているため、SL 点検による補正は行わないこととする。

2. 補正方法

O3 観測値は、オゾン波長組の大気外定数 O3ETC とオゾン波長組の吸収係数の差 O3absn の観測定数を使用して算出される。また SO2 観測値は、SO2 波長組の大気外定数 SO2ETC と SO2 波長組のオゾン吸収係数の差 SO2absn と SO2 波長組についてのオゾンに対する吸収係数比を使用して算出される。

O3 観測値の補正方法は、従来通り SL 点検で得られた O3 二重比から O3ETC(O3 大気外定数)の補正值を算出し、再計算を行う(能登・伊藤：1998)。また、SO2 観測値についても同様の手法で再計算を行う。

次の(1)式、(2)式に O3 観測値と SO2 観測値の SL 点検結果を元に補正した算出式を示す。SL 点検で確認できるのは O3 二重比と SO2 二重比の変化だが、計算上はその変化を O3ETC と SO2ETC の変化とすることができる((1)式の $\Delta O3ETC$ 及び(2)式の $\Delta SO2ETC$ はそれぞれ O3 二重比と SO2 二重比の変化した値)。それを補正值として観測値を再計算する。

$$O_3 = \frac{O_{3double} - (O_3ETC + \Delta O_3ETC)}{O_3absn \times \mu} \quad - (1)$$

O_3 : オゾン全量

$O_{3double}$: 観測で取得する O3 二重比

O_3ETC : O3 大気外定数

ΔO_3ETC : SL 点検から算出した O3 大気外定数の補正值

O_3absn : オゾン吸収係数の差(個々の Brewer 測器に依存)

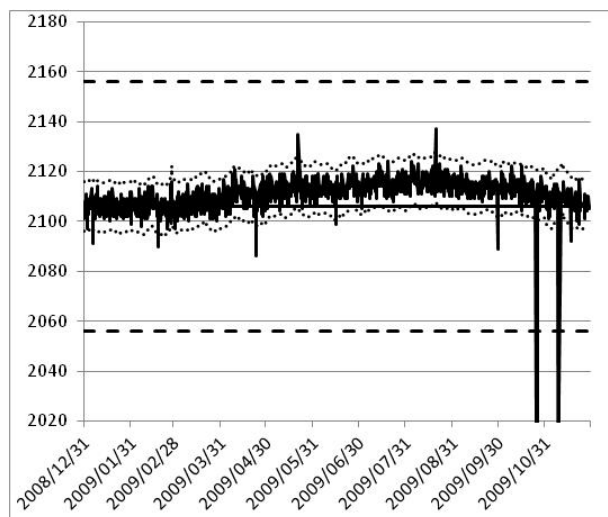


図1 SL点検でのO3二重比の1年間を通した時系列グラフと異常値として除去される範囲を示したグラフ(実線がO3二重比、中央の実直線が基準となるO3二重比、粗い点線が基準となるO3二重比との差で除去する範囲(a)、細かい点線が5日移動平均との差で除去する範囲(b)を示す)

μ : 相対大気路程

$$SO_2 = \left(\frac{SO_{2double} - (SO_2ETC + \Delta SO_2ETC)}{2.35 \times \Delta \alpha \times \mu} - \frac{O_{3corr}}{2.35} \right) - (2)$$

SO_2 : 二酸化硫黄全量

$SO_{2double}$: 観測で取得する SO2 二重比

SO_2ETC : SO2 大気外定数

ΔSO_2ETC : SL 点検から算出した SO2 大気外定数の補正值

2.35 : 二酸化硫黄のオゾンに対する補正係数(吸収係数の比)

O_{3corr} : (1)式により補正したオゾン全量

SL 点検で得られる O3 二重比と SO2 二重比の中には補正值算出に採用できない異常値が含まれており、それを除去するため次の 2 つの処理を行っている(図 1)。

- Brewer 校正時の O3 二重比および SO2 二重比を基準とし、そこから一定の範囲を外れた点検値を除去する。
- (a)で採用された点検値について、点検日とその前後 2 日間、計 5 日間の移動平均値から一定の範囲を外れた点検値を除去する。

ただし、異常値の閾値については、測器の特性や設置場所に依存するため、その都度設定する必要がある。

この処理により採用された個々の O3 二重比と SO2 二重比の変化を日平均した値から O3ETC と SO2ETC の補正值を算出する。また、1 日の SL 点検値が全て欠測の場合は前日の補正值を使用することとする。

以上の処理後、求めた O3ETC の補正值と SO2ETC の補

正值から(1)式、(2)式を使用して O3 観測値と SO2 観測値を再計算する。なお、O3 観測と SO2 観測には直射光観測(Direct Sun 観測：以下 DS 観測と呼称)または天頂光観測の 2 種類の観測があるが、DS 観測のみ補正する。

3. 使用したプログラム言語

補正プログラムは、「Brewer O3 & SO2 Recalculation」という名前で JAVA を使用して作成した。プログラムは、JAVA の特徴であるが、それぞれの OS に合わせたランタイム(Java Runtime Environment：JRE、無償で取得できる)をインストールすれば、その OS に殆ど依存せず使用できる。開発に使用した JAVA の Version は JDK(Java Development Kit) 1.7.0 でグラフ描画に JFreeChart1.0.14 を使用した。

4. プログラムの概要

4.1 ファイルとディレクトリ

以下に実行プログラムファイルおよび再計算に必要なファイルと再計算によって作成されるファイル、そしてそのファイルのディレクトリ構造を示す。なお、フォルダ名とファイル名に記述される文字パターンは、DDD がユリウス日、YYYY が観測年(YY の場合は下 2 桁)、### が測器番号である。

・ファイル

(プログラムファイル)

(1) Brewer_Recalculation.jar：実行ファイル

(2) Setting.ini：

測器番号や処理年、各ファイルのディレクトリ等を記述した設定ファイル(以下設定ファイルと呼称)

(再計算時に必要なファイル)

(3) BDDDDYY.###：

Brewer 処理部で 1 日 1 つ作成される SL 点検や DS 観測等で取得した値を保存したファイル(以下 B ファイルと呼称)

(4) calib_###.txt：

校正時の O3ETC と SO2ETC 及び O3 二重比と SO2 二重比を記述したファイル(以下校正値ファイルと呼称)

(5) ICFDDDDYY.###：

Brewer が校正等で測器定数を新たに設定する度に作成されるその時の測器情報を記録したファイル

(再計算で作成されるファイル)

(6) CDDDDYY.###：

再計算により補正された DS 観測値のみを B ファイルと同じ形式で保存したファイル(以下 C ファイルと呼称)

(7) Simple_SLYYYY.###：

処理年の SL 点検値を全て 1 つにまとめたファイル

(8) Obs_DSYYYY.###：

処理年の補正前の DS 観測値を全て 1 つにまとめたファイル

(9) Corr_DSYYYY.###：

処理年の補正後の DS 観測値を全て 1 つにまとめたファイル

(10) DailyYYYY.###：

処理年の SL 点検値や DS 観測値、各 ETC と各二重比の日平均値をまとめたファイル

・ディレクトリ

再計算ファイル用ディレクトリの構造は、気象庁の Brewer データを保存しているディレクトリ構造と同じ構造になるように設定した。

(プログラムファイル用ディレクトリ)

----- プログラム保存ディレクトリ(任意)

|---- Brewer_Recalculation.jar(ファイル)

|---- Setting.ini(ファイル)

|---- calib(フォルダ)

| |---- calib_###.txt(ファイル)

|---- icon(フォルダ)

(再計算ファイル用ディレクトリ)

----- ファイル保存ディレクトリ(任意)

|---- Data_###(フォルダ)

| |---- DYYYY(フォルダ)

| |---- BDDDDYY.###(ファイル)

| |--- ###(フォルダ)

| | |---- ICFDDDDYY.###(ファイル)

| |--- Correction(フォルダ)

| |---- CDDDDYY.###(ファイル)

| |---- Simple_SLYYYY.###(ファイル)

| |---- Obs_DSYYYY.###(ファイル)

| |---- Corr_SLYYYY.###(ファイル)

| |---- DailyYYYY.###(ファイル)

4.2 準備

実行ファイルを立ち上げる際、設定ファイルと校正値ファイルの中身が読み込まれるため、それら 2 つのファイルを予め作成しておく必要がある。2 つのファイルの中身を以下に記す。

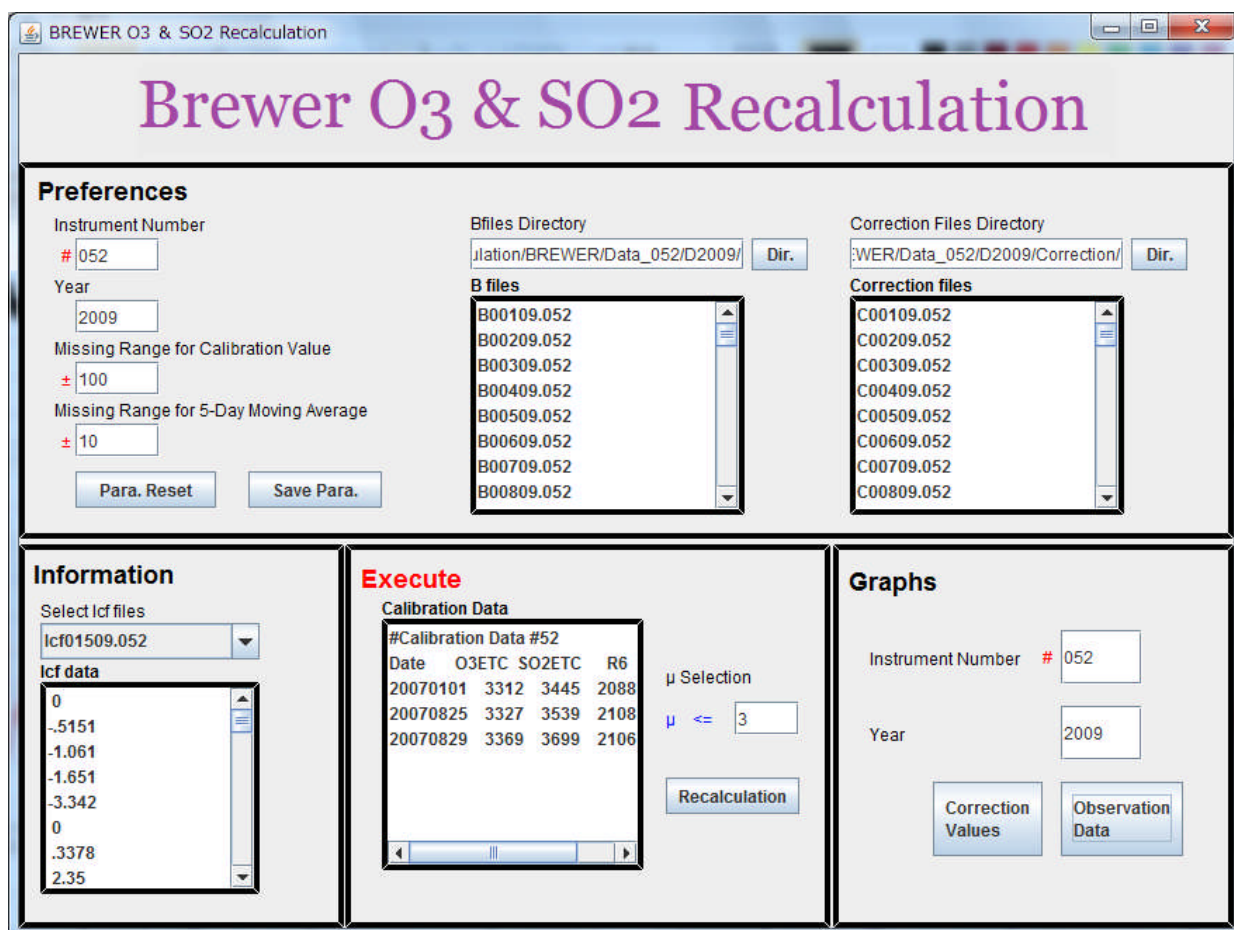


図 2 O3&SO2 再計算プログラムのメイン画面

(設定ファイル：Setting.ini)

設定ファイルに記述する内容は、再計算用ファイルディレクトリ (Files_Directory) 以外は、プログラム画面上で書き換えることができる。

(1) Files_Directory :

ファイル保存ディレクトリ(4. 1 のディレクトリ階層を参照)を指定

(2) Instrument_Number : 測器番号

(3) Year : 処理年

(4) Missing_Range_for_Calibration_Value :

Brewer 校正時の O3 二重比と SO2 二重比から SL 点検時の異常値を除去する範囲を指定

(5) Missing_Range_for_5-Day_Moving_Average :

SL 点検の O3 二重比と SO2 二重比の 5 日移動平均値から個々の SL 点検の異常値を除去する範囲を指定

(6) Mue_Selection :

観測データとして採用する μ の値を指定

(校正値ファイル：calib_###.txt)

校正値ファイルは、Brewer 校正時の値を日時の古い順

から記述したファイルで、測器毎に作成する必要がある。また、校正時以外でも測器のトラブルで基盤を交換する等の応急処置を行った場合、SL 点検値がシフトしてしまうことがある。その場合は直後の SL 点検値を基準とするように設定する。

(1) Date : 校正年月日

(2) O3ETC : 校正時の O3ETC

(3) SO2ETC : 校正時の SO2ETC

(4) R6(O3 二重比) : 校正時の SL 点検による O3 二重比

(5) R5(SO2 二重比) : 校正時の SL 点検による SO2 二重比

4.3 メイン画面

プログラムを立ち上げると、メインウィンドウ(図 2)が表示される。表示画面は Preferences, Information, Execute, Graphs の 4 つ項目に分けて配置した。4 つの項目について以下に記す。

(a) Preferences

設定ファイルの内容を表示する。画面内で設定ファイルの内容を変更し保存を行えば、次回に引き継ぐことができる。

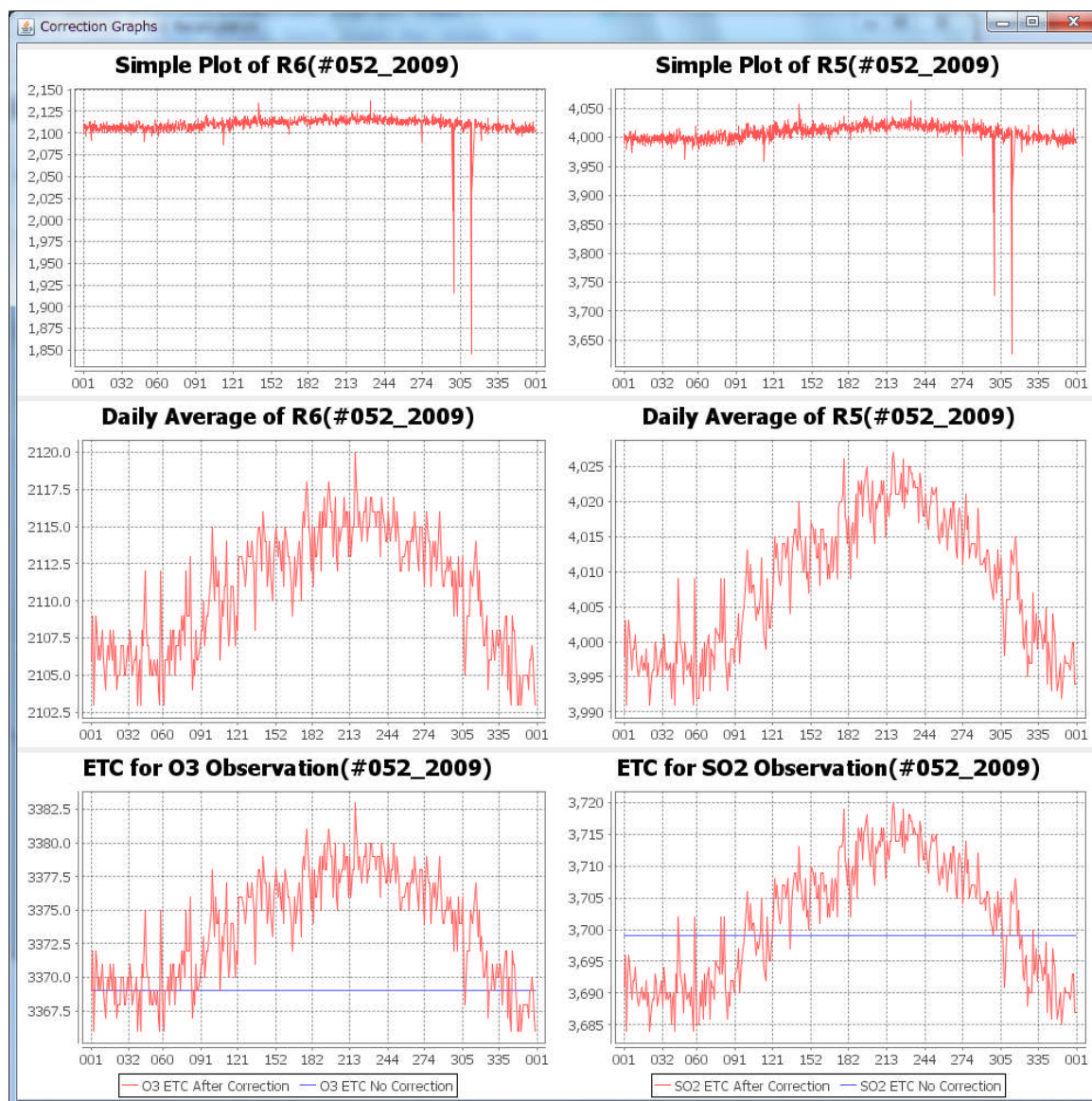


図 3 補正值グラフ画面

(a-1) Instrument Number : 設定ファイルの(1)に対応

(a-2) Year : 設定ファイルの(2)に対応

(a-3) Missing Range for Calibration Value :

設定ファイルの(3)に対応

(a-4) Missing Range for 5-Day Moving Average :

設定ファイルの(4)に対応

(a-5) Bfiles Directory :

再計算に必要な B ファイルのディレクトリで、Instrument Number と Year の変更に対応して、ディレクトリを指定

(a-6) Correction Files Directory :

再計算で作成されるファイルのディレクトリで、Instrument Number と Year の変更に対応して、ディレクトリを指定

(a-7) Bfiles : 保存されている B ファイルの一覧

(a-8) Correction files : 再計算で作成されたファイル一覧

(a-9) Dir. : ディレクトリ選択用 GUI 画面が立ち上がる

(a-10) Para. Reset :

測器番号や年などを変更した場合、各読み込むファイルやディレクトリ先の再設定を行うボタン

(a-11) Save Para. :

測器番号や年などを変更した場合、その変更を設定ファイルに保存するボタン

(b) Information

(b-1) Select ICF Files :

測器情報を記述した ICF ファイルのプルダウン選択メニュー

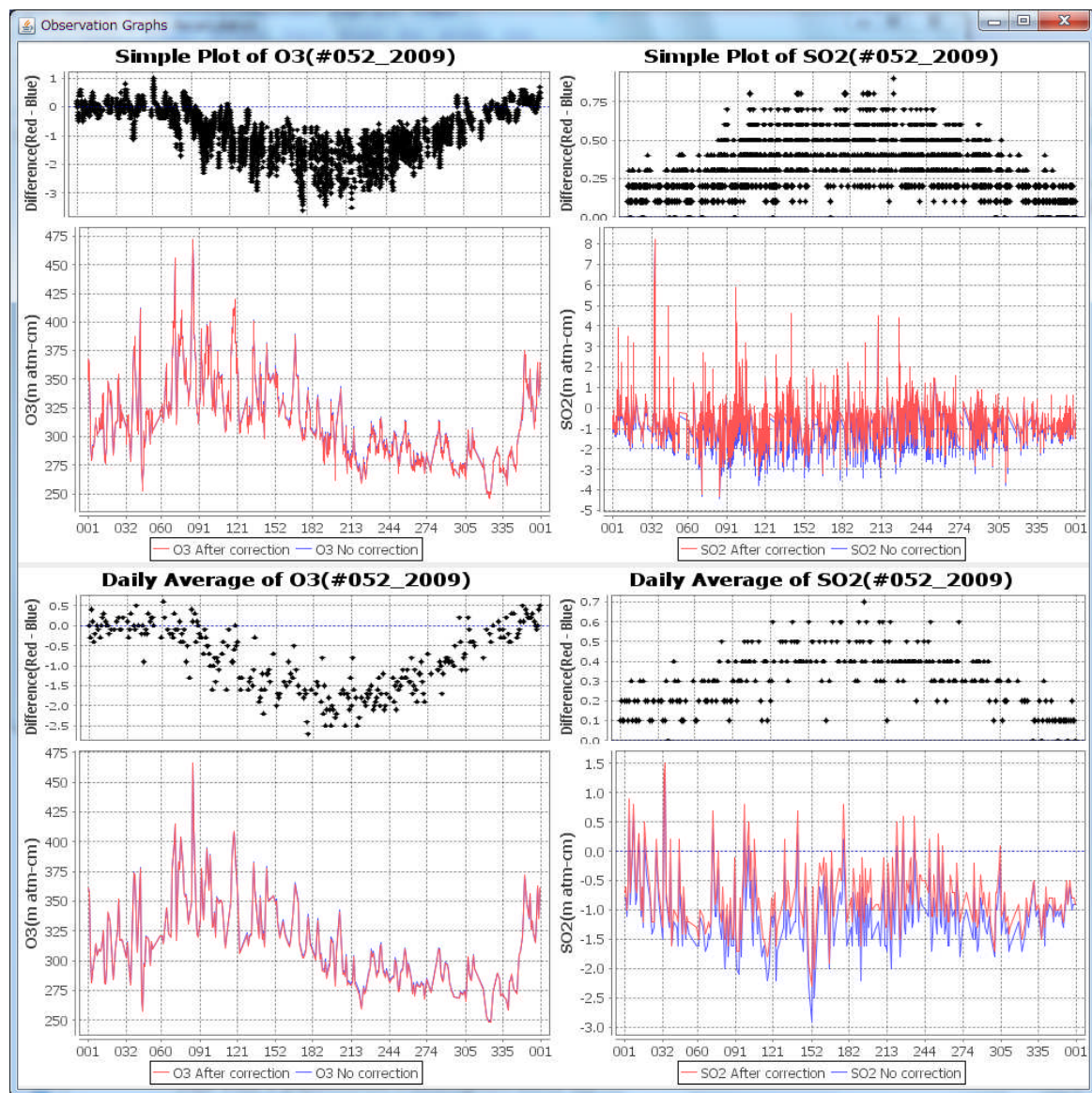


図 4 観測値補正グラフ

(b-2) ICF Data : 選択した ICF ファイルの中身を表示

(c) Execute

(c-1) Calibration Data :

Instrument Number で指定した測器の校正値ファイルの中身を表示

(c-2) μ Selection : 設定ファイルの(6)に対応

(c-3) Recalculation :

指定した μ および O3 の標準偏差が 2.5 以下のデータについて再計算を行う再計算実行ボタン

(d) Graphs

(d-1) Instrument Number :

設定ファイルの(2)に対応した値だが、再計算と別にグラフ表示のみに適用される

(d-2) Year :

設定ファイルの(3)に対応した値だが、再計算と別にグラフ表示のみに適用される

(d-3) Correction Values :

再計算により作成した補正值のグラフ表示ボタン

(d-4) Observation Data :

再計算により作成した補正前後の観測値のグラフ表示ボタン

4.4 補正值グラフ画面

Graph の項目の Correction Values のボタンを押下すると再計算により作成された Simple_SLYYYY.### と DailyYYYY.### ファイルを読み込み、補正值グラフウィンドウ(図 3)を表示させる。横軸は指定年のユリウス日で表示され、縦軸のスケールは表示データの値に合わせて自

動で設定される。グラフ内で標記されている R6 は O3 二重比を示し、R5 は SO2 二重比を示している。

(a) Simple Plot

SL点検により取得した O3 二重比(R6)と SO2 二重比(R5)の指定年の全データを表示しており、前述の SL 点検の異常値を除去する処理を行う前データである。

(b) Daily Average

O3 二重比(R6)と SO2 二重比(R5)の SL 点検の異常値を除去したあとの日平均値を表示している。

(c) ETC

O3ETC と SO2ETC の補正前後のグラフを表示している。ETC は通常、校正時に値付けされた一定の値であるが、SL 点検値の変化を考慮した値となっている。

4.5 観測値グラフ画面

Graph の項目の Observation Data のボタンを押下すると再計算により作成された Obs_DSYYYY.### と Corr_DSYYYY.###, DailyYYYY.###ファイルから補正前後の観測値グラフウィンドウ(図 4)が表示される。上下がセットになっており、上に補正前後の偏差を下に補正前と補正後の観測値を表示する。横軸は指定年のユリウス日、縦軸は O3 及び SO2 の値で単位は m atm-cm である。

(a) Simple Plot

補正前後の DS 観測値の全データと補正後から補正前の観測値の差分を表示する。

(b) Daily Average

補正前後の DS 観測値の日平均値と補正後から補正前の観測値の差分を表示する。

4.6 使用方法

以下に使用手順を示す。

- (1) 4. 1 のディレクトリの階層のとおり各ファイルを保存する。
- (2) 設定ファイルを作成する(初回のみ)。
- (3) 処理する Brewer 観測器の補正值ファイルを作成する。
- (4) プログラムを立ち上げる。
- (5) 表示されている内容を確認し、Execute 項目の Recalculation ボタンを押下する。
- (6) Preferences 項目の Correction フォルダに再計算後のファイルが作成されるのを確認する。
- (7) Graphs 項目の Correction Values ボタンおよび Observation Data ボタンを押下し、補正結果を確認する。

(続けて再計算処理を行う場合)

(8) Preferences 項目の Instrument Number また Year を変更し、Para. Set ボタンを押下する。

(9) 表示されている内容を確認し、Execute 項目の Recalculation ボタンを押下する。

(これまでの再計算結果をグラフ表示させる場合)

(10) Graphs 項目の Instrument Number また Year を変更し Correction Values ボタンおよび Observation Data ボタンを押下する。

5. 測器番号#52 の MKⅡ の SL 点検値および DS 観測値の補正結果

前述のグラフ画面の説明に用いた図 3 と図 4 は、測器番号#52 の MKⅡ で観測した 2009 年の館野における SL 点検値とそれを使用した補正值グラフ、 $\mu 3$ 以下の DS 観測値の補正結果を示した観測値グラフである。

図 3 の補正值グラフをみると、上段と中段のグラフで、O3 二重比(R6)と SO2 二重比(R5)が冬に比べ夏に大きくなっている。また、下段のグラフで、補正前後の O3ETC を比較すると補正前の ETC は冬場にほぼ一致し、夏場にやや偏差が大きくなっている。補正前後の SO2ETC を比較すると補正前の SO2ETC は年間を通した変動のほぼ中間に位置している。

図 4 の観測値グラフをみると、O3 観測値は補正前より補正後は小さく、特に夏の多い時で約 3m atm-cm 小さくなっている。SO2 は、2. 補正方法の SO2 算出式(2)で示したように O3 の補正による影響が大きく、補正前より補正後は値が大きくなっている。

上記の結果は、測器番号#52 の MKⅡ の 2007 年と 2008 年にもみることができ、これは館野の気候に対する MKⅡ または#52 測器の固有の特性であると考えられる。

6. まとめ

MKⅡ で観測した O3 観測値および SO2 観測値の補正を誰でも簡単にできるプログラムを開発した。このプログラムを使用すれば、MKⅡ で観測した観測値の補正作業にかかる時間を大幅に削減できる。また、現在気象庁で観測している Brewer の正規観測器は、今回の補正が必要ない MKⅢ であるが、予備の測器は MKⅡ であるため今後も MKⅡ で観測する機会があり、その際は補正作業が必要になる。

7. 今後の課題

図 4 の観測値グラフにおいて、SO2 が負の値になっており、正しい SO2 の観測値に補正するためには Brewer 準

器との比較からさらに別の補正値を算出しなければならない。また、O3 と SO2 の観測について、今回は直射光観測(DS 観測)のみの補正を行ったが、天頂光観測(ZS 観測)もその補正は必要である。今後は、今回作成したプログラムにそれらの処理を追加させる必要がある。

謝 辞

本稿を草するに際し、高層気象台観測第三課伊藤主任研究官には Brewer データの特性およびその処理の内容等々、多大なご助言を頂いた。また、同課の島村研究官には過去の補正方法について、多大なご助言を頂いた。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

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。気象庁研究時報, **43 - 5**, 213 - 273.

伊藤真人・宮川幸治 (2001)：二重分光光度計ブリュエー MKⅢによる紫外域日射観測。高層気象台彙報, **61**, 5 - 28.

Kipp & Zonen (1996)：Brewer MKⅢ Spectrophotometer Final Test Record, BR#174. Kipp & Zonen Inc., 75pp.

Kipp & Zonen (2008a)：Brewer MKⅢ Spectrophotometer Operators Manual. Kipp & Zonen Inc., 132pp.

Kipp & Zonen (2008b)：Brewer MKⅢ Spectrophotometer Service Manual. Kipp & Zonen Inc., 125pp.

McElroy, C.T., V. Savastiouk and T. Grajnar (2008)：Standard operating procedures manual for the Brewer Spectrophotometer, Ver. D.01. Environment Canada, 138pp.

能登美之・伊藤真人 (1998)：南鳥島におけるオゾン観測資料の補正方法について。高層気象台彙報, **58**, 39 - 44.

(別添) 新たに作成されるファイルのフォーマット

ファイル全て、カンマ区切りの CSV 形式で作成した。下記に 1 セットのデータに対して記録される順番とその内容を示す。ファイルの説明については、**4. 1**を参照。

(Simple_SLYYYY.###)

1	日付(UTC)	8	単一波長比平均 R3	15	単一波長比の標準偏差 #R3
2	時刻(UTC)	9	単一波長比平均 R4	16	単一波長比の標準偏差 #R4
3	測定中の太陽天頂角の平均値	10	SO2 二重比平均 R5	17	SO2 二重比の標準偏差 #R5
4	測定中の大気路程の平均値	11	O3 二重比平均 R6	18	O3 二重比の標準偏差 #6R
5	測器温度	12	光子計数値 F1	19	光子計数値の標準偏差 #F1
6	単一波長比平均 R1	13	単一波長比の標準偏差 #R1		
7	単一波長比平均 R2	14	単一波長比の標準偏差 #R2		

(Obs_DSYYYY.###, Corr_DSYYYY.###)

1	日付(UTC)	8	単一波長比平均 R3	15	単一波長比の標準偏差 #R2
2	時刻(UTC)	9	単一波長比平均 R4	16	単一波長比の標準偏差 #R3
3	測定中の太陽天頂角の平均値	10	SO2 二重比平均 R5	17	単一波長比の標準偏差 #R4
4	測定中の大気路程の平均値	11	O3 二重比平均 R6	18	SO2 二重比の標準偏差 #R5
5	測器温度	12	SO2 観測値	19	O3 二重比の標準偏差 #6R
6	単一波長比平均 R1	13	O3 観測値	20	SO2 観測値の標準偏差
7	単一波長比平均 R2	14	単一波長比の標準偏差 #R1	21	O3 観測値の標準偏差

(DailyYYYY.###)

1	日付(JST)	7	異常値除去後の O3 二重比	13	補正前の O3 日平均値
2	O3 吸収係数	8	異常値除去後の SO2 二重比	14	補正後の SO2 日平均値
3	SO2 の O3 に対する補正係数	9	採用した SL 点検の回数	15	補正後の O3 日平均値
4	SO2 吸収係数	10	補正後の O3 大気外定数	16	採用した DS 観測の回数
5	補正前の O3 大気外定数	11	補正後の SO2 大気外定数		
6	補正前の SO2 大気外定数	12	補正前の SO2 日平均値		