

波長別紫外域日射観測表示プログラムと参照スペクトルの改訂

能登 美之*

Display Program of UVB Observation and Reference spectrum

Yoshiyuki NOTO

要旨

ブリュワー分光光度計を用いた波長別紫外域日射観測表示プログラム(以下表示プログラム)は、観測スペクトルのリアルタイムの表示、時系列データの表示、日・月観測表の印刷などの機能を備えて、観測結果の監視や品質管理などの定常観測業務の補助となってきた。しかし、ブリュワー分光光度計を MK II から MK III へ更新して観測可能な波長範囲が拡大したことや、紫外線情報提供における UV インデックスの導入などで、従来のプログラムを改訂する必要が生じた。そこで、表示プログラム改訂して、データ処理や表示機能を増やすとともに、基準となるスペクトル(以下、参照スペクトル)を放射照度データから再計算した。その結果、①スペクトルの表示波長範囲の拡大、観測時間の拡大表示、点検結果の表示項目の拡大などで今後の実況監視を容易にすることができた。さらに、②観測点毎に放射照度データを用いた参照スペクトルを作成して比較したところ、それぞれの観測点における大気の特徴が相対的に明らかになり、共通の参照スペクトルがあれば、統一した基準で観測スペクトルを評価できる可能性があることが分かった。

1. はじめに

ブリュワー分光光度計(以下ブリュワー)を用いた波長別紫外域日射観測は、現在、札幌、つくば、那覇の国内3か所及び南極昭和基地(以下昭和)で実施されている。ブリュワーは制御プログラムによって、決められたスケジュールで自動観測を行う。オリジナルの制御プログラム(SCI-TEC:1999)は太陽天頂角制御で観測を行うが、気象庁では時間毎の観測を実施するため、伊藤・宮川(2001)は決められた観測時刻のスケジュールに従って自動観測を行うように時間制御に改造した。この制御プログラムは、観測中の制御情報の表示に加え紫外域日射量及びオゾン全量の観測結果などを数値で表示するが、観測されたスペクトルを図として表示しない。

そこで、能登・伊藤(2000)は、制御装置の WINDOWS 化に伴って、観測結果を視覚的に見やすい図で表示するプログラム(以下表示プログラム)を開発した。この表示プログラムは、観測スペクトルの表示をはじめ、波長積分値のグラフの表示、日及び月の観測表を印刷する機能などを持っている。これによって、観測担当者は観測結果を視覚的に把握でき、測器の異常の早期発見などの監視

を容易にした。

しかし、気象庁は 2001 年に観測可能な波長範囲が拡大したブリュワー MK III を導入し、2005 年には紫外線情報提供に伴う UV インデックスの導入(気象庁:2007)があり、従来の表示プログラムを改訂する必要が生じた。また、表示プログラムで使用する観測スペクトルを監視するための基準のスペクトル(以下参照スペクトル:伊藤ほか:1991,小林・下道 1993)も、波長範囲をブリュワー MK III に合わせて拡張する必要が生じた。

本報告では、改訂した表示プログラムの追加された機能を示すとともに、放射照度を用いた新しい参照スペクトルの特徴を示す。

2. ブリュワー分光光度計の更新と UV インデックスの導入

ブリュワー MK III は走査波長範囲が 286.5 ~ 363.0nm(従来のブリュワー MK II の波長範囲は 295 ~ 325nm)に拡張されて UV-B 領域の短波長と UV-A 領域の大半の波長域の観測が可能になった。また、二重分光方式の採用により短波長域(波長 300nm 以下)での迷光の影響が減少したため、放射照度の計算あたり、迷光の影響を補正する必要がなくなった。

*高層気象台 観測第三課

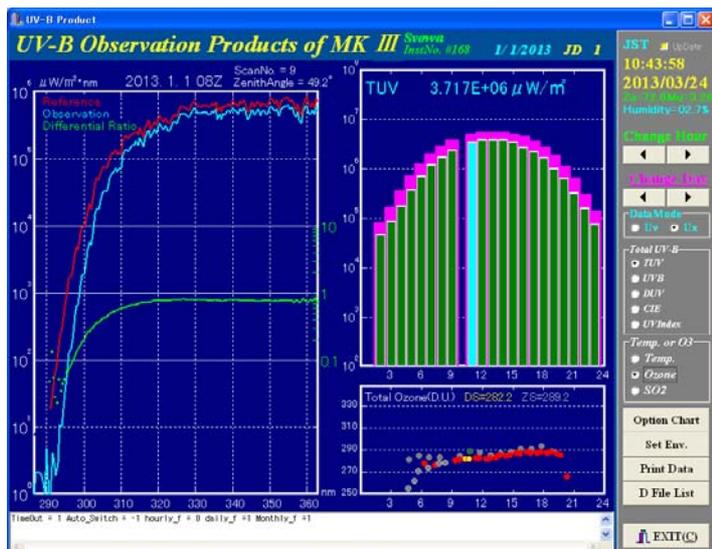


図 1 表示プログラムの表示画面例(南極昭和の 2013 年 1 月 1 日)

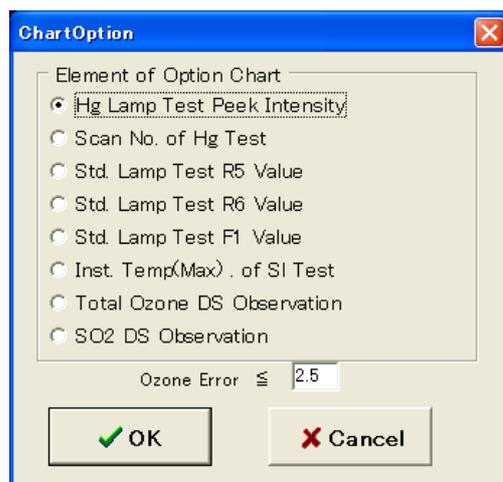


図 2 測器点検結果などの年間時系列表示の選択画面

拡張された観測波長範囲の観測(ux-観測)は定常観測(波長範囲 295~325nm の uv-観測)の合間(毎正時 30 分)で観測するようにスケジュールに組み込まれ、データは制御装置内に保存されている。

一方 UV インデックスは、国際照明委員会(CIE : Commission Internationale de l'Eclairage)が定義した人体への波長別影響度の指標として CIE 作用スペクトルの重みを乗じて照度を積分した紅斑紫外線量(CIE 紫外線量)を 25mW/m^2 で除した値である。国内で観測される UV インデックスの値は最大でおよそ 13 程度で、「UV インデックスの運用ガイド」(WHO : 2002)や「紫外線保健指導マニュアル」(環境省, 2003)で示されており、気象庁における紫外線情報提供においても採用されている指標である。

3. 表示プログラムの改訂

3.1 表示プログラムの機能

表示プログラムは次の機能を有している。

① 放射照度の計算とスペクトルの表示

ビューワーによって測定された各波長の光子計数値を暗計数補正, 迷光補正(MK II の場合のみ), 光子計数率への換算, 不感時間補正, 放射照度(エネルギー量)への換算など(以下「各種補正」とする)を施し(能登・伊藤 : 2000), 観測スペクトルと参照スペクトルをリアルタイムに表示する。

② 波長積分値の表示

観測スペクトルから波長積分した値(TUV, UVB, DUV, CIE)を計算して時間毎の棒グラフで表示する。ここで、それぞれの積分値は以下の定義による。

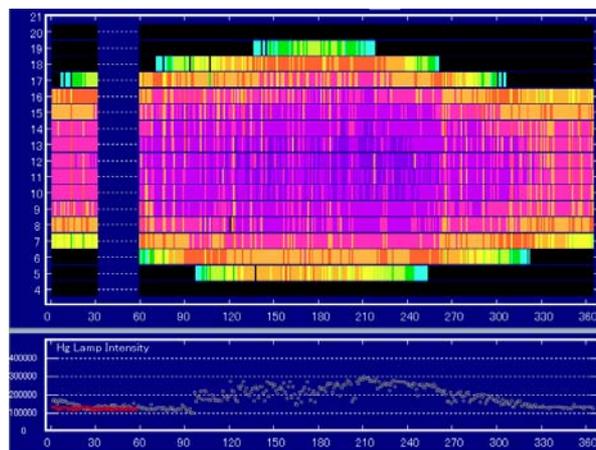


図 3 紫外域日射量積算値(上グラフ), 及び水銀ランプ点検によるランプ照度(下グラフ)の年間時系列表示例

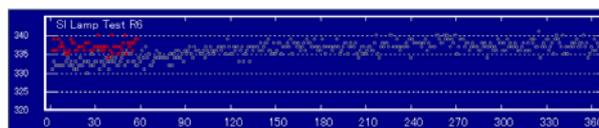


図 4 標準ランプ点検結果(R6 値 : オゾン二重比)の年間時系列表示例

- ・ TUV : 波長 295~325nm の積分値
- ・ UVB : 波長 290~315nm の積分値
- ・ DUV : 有害紫外線量(Wester : 1981)
- ・ CIE : 紅斑紫外線量で 2. の通り

③ オゾン全量・二酸化硫黄全量・測器温度の時系列図の表示

④ 日及び月観測表の印刷と月集計ファイルの作成

日及び月観測表を自動印刷し、月集計ファイルを自動で作成する。

⑤ 欠測の注意喚起

所定時間内に観測データが得られなかった場合、欠測を知らせるアラーム機能で観測担当者に報知する。

3.2 表示プログラムの改訂

今回の表示プログラム改訂により追加した機能は以下通り。

- ① 波長 286.5～363.0nm の観測結果(ux-観測)の放射照度計算と表示(図 1)
- ② 波長積分紫外線量で UV インデックスの計算と表示
- ③ 紫外線量とオゾン全量、二酸化硫黄全量の観測結果の年間時系列表示(図 3)
- ④ 主な自動点検結果の時系列表示(図 4)
- ⑤ 波長積分値グラフの 23 時間化(図 1)

観測値の年間時系列及び自動点検結果の時系列の項目は図 2 のメニューで選択して、図 3 及び図 4 の例の通り表示される。観測値の年間時系列は前年の観測結果と比較して表示され、大まかな観測結果の流れを監視できる。また、自動点検結果の時系列表示により大まかな測器状態を監視できる。

4. 参照スペクトルの改訂

4.1 参照スペクトルの改訂点

伊藤ほか(1991)は波長別紫外域日射観測の観測スペクトル(伊藤ほか(1991)は「実測スペクトル」と表現している)を評価するために参照スペクトルを求め、観測スペクトルと参照スペクトルから得られる変形パラメータ(α , β)による評価を示した。この他、参照スペクトルは観測の実況監視をする上でも比較する基本スペクトルとして有用であるため、表示プログラムにおいても観測スペクトルと比較して表示される。

参照スペクトルは、これまではブリューワーMK II 用として、uv-観測(波長 298～325nm)に対応して、光子計数値を用いたものが利用されてきた(小林・下道：1993)が、本報告では以下の点を考慮して再計算を行った。

- ① スペクトルの波長範囲を波長 296.5～363.0nm と拡大し 0.5nm 毎に 154 波長について計算する。
- ② 放射照度(エネルギー量($\mu\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{nm}$))のデータから計算する。

放射照度データを用いて計算される参照スペクトルは、(a)測器の感度変化に依存しないため、長期間のデータを使って計算できること、(b)観測測器に依存しないこと、(c)他の観測点における観測スペクトルや参照スペクトル

との比較が可能であること、などの利点がある。

4.2 使用した基礎データ

放射照度データを得るためには 3.1 で示した各種補正の他に測器感度の変化を補正する必要がある(伊藤ほか：2000, 伊藤：2002)。各観測点では定期的に外部標準ランプ点検が実施されており、この点検結果から得られた測器の感度トレンド(感度変化)で補正を施して、放射照度の絶対値の基礎データを得た。気象庁においても同様の補正方法により求めた観測値が公表されている。

データの期間と選択の条件は表 1 の通りである。札幌では、冬季間積雪による地表面アルベドの変化が大きいため、多重散乱が影響する可能性がある。この影響を除くため、無積雪期間のデータのみを採用した。また、昭和については、オゾンホールが出現し、他の観測点では見られない大気条件変化があることから、データの選択条件を課さない「参照スペクトル A」と、オゾンホールの面積を計算する場合の基準とされるオゾン全量が 220m atm-cm(例えば気象庁：2011)以上である日のデータを用いた資料でも計算し、「参照スペクトル B」とした。

表 1 参照スペクトル計算に用いた各基礎データ

地 点	測器番号	データ期間	データ数	データの選択条件
札幌	#169	2002～2003 年	6044	積雪のない期間
つくば	#174	2002～2003 年	6646	無し
那覇	#175	2002～2003 年	8690	無し
昭和 A	#168	2007～2011 年	26997	無し
昭和 B	#168	2007～2011 年	12248	オゾン全量 220m atm-cm 以上

4.3 参照スペクトルの計算方法

観測時の太陽天頂角に対する波長別放射照度の分布を図 5(昭和における波長 300, 310, 325nm の例)に示す。各波長の分布の上限値は、なめらかな曲線(以下、「上側境界線」(伊藤ほか：1991)という。)となる。この上側境界線を下記の cosine の級数式(1)で近似して、任意の太陽天頂角に対する放射照度を決めることが出来る。

$$\log Irr(\lambda, za) = \sum_{i=1}^8 Q_i(\lambda) \cos\{\pi(i-1)za/180\} \quad (1)$$

ここで、 Irr は放射照度、 λ は波長、 za は太陽天頂角、 $Q_i(\lambda)$ は曲線の係数を表わす。実際の計算は、一つの波長 λ に対して 8 個の係数 $Q_i(i=1\sim 8)$ を求めることである。

計算方法は伊藤ほか(1991)の方法を基本とし、太陽天頂角の 1°毎の最大値から曲線の係数を求め、曲線の標準偏差よりも上下に外れたデータを棄却して繰り返す方法を採用した。計算の手順は以下の通りである。

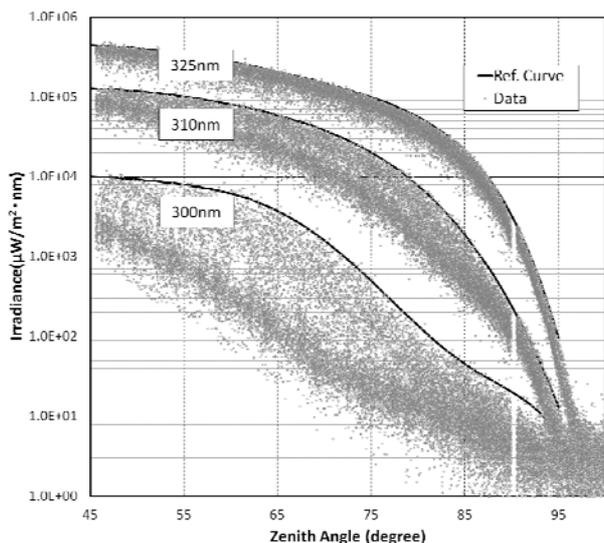


図 5 各波長の太陽天頂角に対する波長別放射照度分布と上側境界線の昭和の例

- ① 各波長の基礎データを太陽天頂角 1°度幅で分割しそれぞれの最大値と太陽天頂角を抽出する。
- ② ①の最大値から最小二乗法により曲線の係数と標準偏差を計算する。
- ③ 曲線の標準偏差より上側または下側に外れた基礎データを除いたデータセットを作る。
- ④ ③のデータセットから①と同様に最大値を求め③までを繰り返す。
- ⑤ 繰り返す中で、標準偏差の変化が 0.01 を下回る場合にその曲線を求める上側境界線として係数を決定する。

以上の手順で、波長 286.5～363.0nm まで 0.5nm 毎に 154 波長分の係数を計算し、合計 8×154 個の係数群を求めた。但し、波長 290nm 以下の短波長域では、島村(2011)が示したように測器の測定限界を超えるため精確な上側境界線は求めていない。

図 6 に、太陽天頂角 50, 60, 70, 80, 90°の昭和の参照スペクトル A を示し、観測スペクトルとの比較例を図 7 に示す。この参照スペクトルは、過去の観測データを使用していることからその地点におけるオゾン全量、エアロゾル、水蒸気などの大気環境を反映したスペクトルと言える。しかし、計算の過程から平均的(気候值的)なスペクトルではなく、様々な大気条件下における「各波長の放射照度のほぼ最大値のスペクトル」であるため、図 7 で比(図中の Ratio)が示すように、通常、観測スペクトルは参照スペクトルよりも低い値となる。

特に UV-B 領域の短波長側では観測時のオゾン全量に依存しておりオゾン全量が多くなるほど比は小さくなる

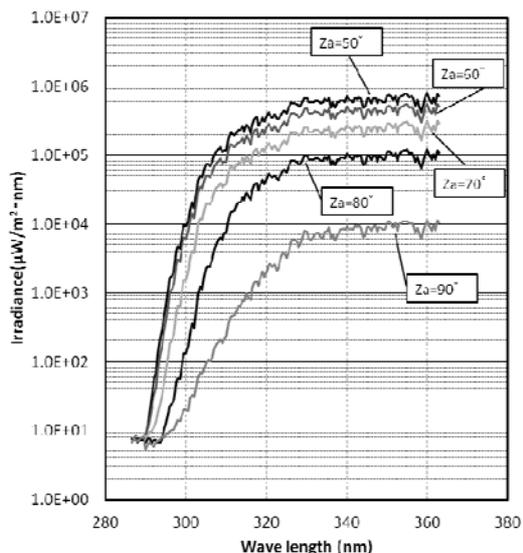


図 6 昭和の参照スペクトル A の例
Za は太陽天頂角を表す。

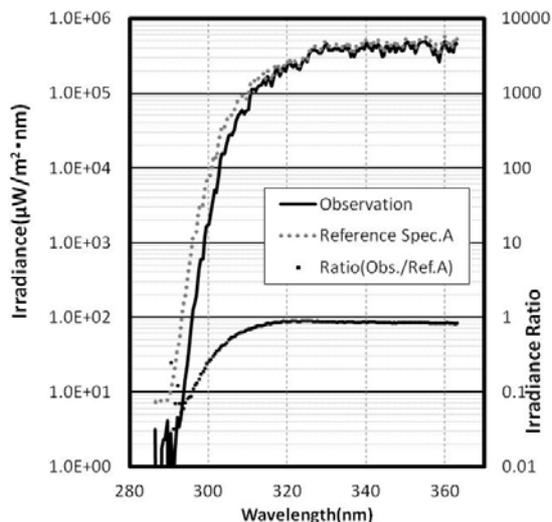


図 7 観測スペクトルと参照スペクトル A の比較
昭和 : 2011 年 11 月 29 日, Zenith=59°, Ozone=221m atm-cm

ことが知られている。従って、各観測地点の参照スペクトルは、それぞれのオゾン全量のほぼ最小値を反映している。それぞれの参照スペクトルは札幌が 280 m atm-cm, つくばが 260 m atm-cm, 那覇が 240 m atm-cm, 昭和 A が 130 m atm-cm, 昭和 B が 220 m atm-cm 程度のオゾン全量に相当するスペクトルである。

5. 参照スペクトルの相互比較

各観測地点の参照スペクトルをつくばの参照スペクトルと比較した。昭和は太陽天頂角が 60°以下の場合、オゾン全量の観測値に偏りがあるため、比較するスペクトルの天頂角を 65°(大気路程 $\mu=2.33$ 程度)とした。

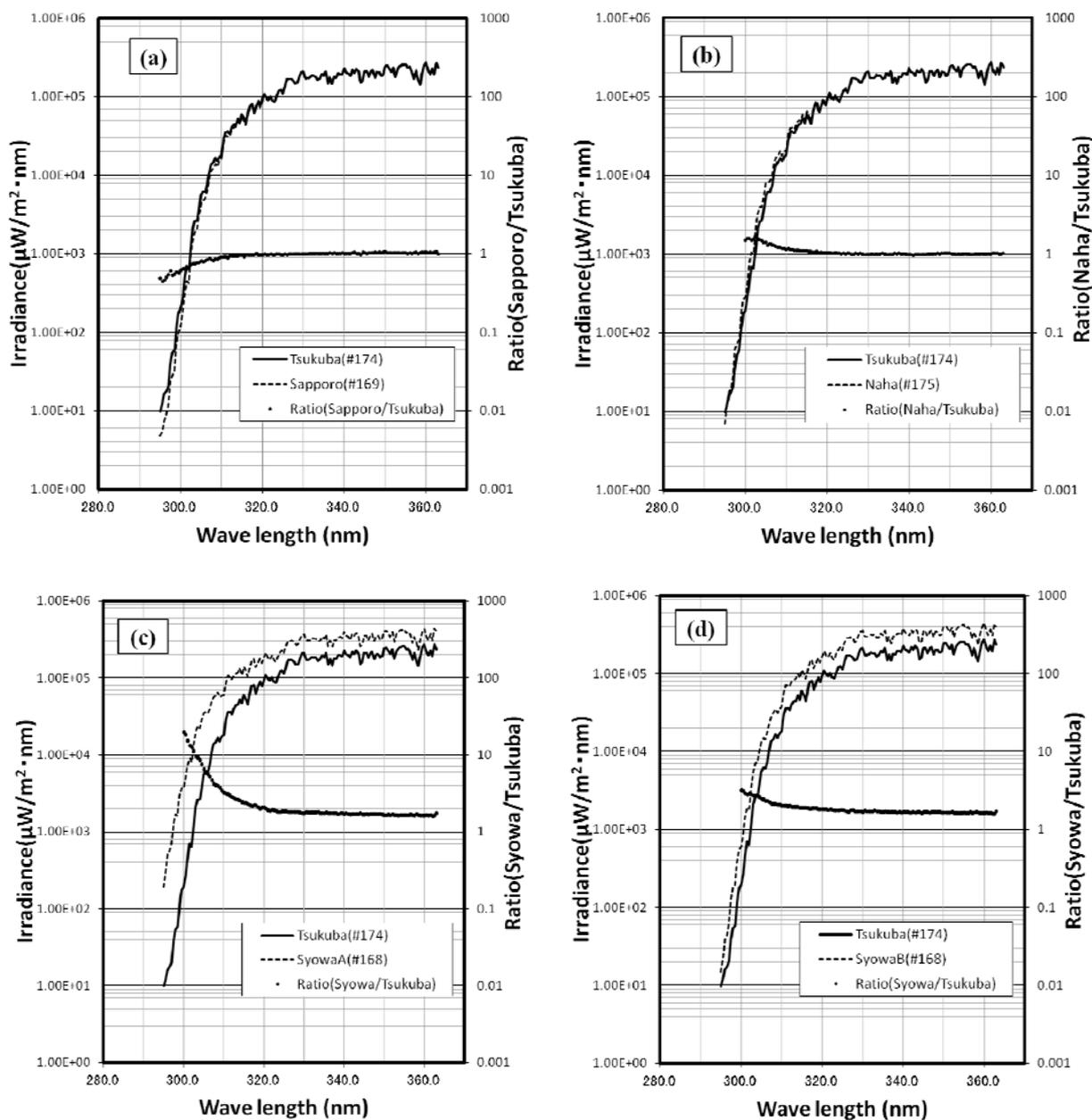


図7 太陽天頂角 65°におけるつくばの参照スペクトルとの相互比較

(a)札幌(測器番号#169)との比較。(b)那覇(測器番号#175)との比較。(c)昭和A(測器番号#168)との比較。(d)昭和B(測器番号#168)との比較。

それぞれの比較を図7に示す。図7の(a)は札幌(測器番号#169)のデータから計算したスペクトルとの比較である。UV-A領域の長波長側ではその比(図中 Ratio)はほぼ1で両スペクトルは一致しているが、UV-B領域では短波長になるほど比は低下しており、波長300nmで0.6程度である。一方、那覇(測器番号#175)との比較(b)では、UV-A領域では札幌と同様にほぼ一致しているが、UV-B領域では逆につくばよりも短波長になるほど上昇しており、波長300nmで1.5程度となっている。

紫外線量(UVB)を計算すると、つくばの 0.269W/m^2 に対して、札幌が 0.243W/m^2 (つくばの90%)、那覇が 0.312W/m^2 (つくばの116%)であった。

昭和(測器番号#168)の参照スペクトルA及びBとつくばの比較を図7の(c)、(d)に示す。昭和の参照スペクトルはUV-A領域の長波長側では、つくばに比べ参照スペクトルAの比は約1.8、参照スペクトルBでは約1.7程度と大きい値を示している。UV-B領域の短波長側では比は更に上昇しており、波長300nmでの比は参

照スペクトル A が 19.6, 参照スペクトル B が 3.2 となった。紫外線量(UVB)は参照スペクトル A が 0.877W/m^2 (つくばの 326%), 参照スペクトル B が 0.543W/m^2 (つくばの 202%)である。

短波長側の比の違いは、伊藤ほか(1991)が提唱した、観測スペクトルの参照スペクトルに対する変形パラメータ α に当たる。 α は主にオゾン全量に依存した値で、比が上に凸となる場合は $\alpha < 0$ となり参照スペクトルが示すオゾン全量より大きい場合を示す。逆に比が下に凸となる場合は $\alpha > 0$ となりオゾン全量が小さい場合である。比が短波長でも直線となる場合が、 $\alpha = 0$ で、参照スペクトルのオゾン全量と同じ場合を示す。

一方、UV-A 領域の差は変形パラメータの β にあたり、伊藤ほか(1991)はオゾン全量に依存しない大気の状態(雲、エアロゾル、地表面アルベド等)が関係しているとしている。この波長域の参照スペクトルは、市街地にある観測点(札幌、つくば、那覇)ではほぼ一致しているが、昭和は A, B 共に大きい方へシフトしている。これは、南極の地表や海水が雪面で覆われて国内の観測点に比べ地表面アルベドが大きく、散乱光の多重散乱によるものとエアロゾルが少ないことが考えられる。

このように相互に比較することで、各観測点の参照スペクトルの相対的な大気環境の特徴を調べられる。

6. まとめ

本報告では、以下の結果を示した。

- ① 紫外域日射観測表示プログラムを改訂して、表示スペクトルの波長範囲の拡大表示、UVインデックス表示、点検値の年間時系列の表示項目の拡大などの表示機能を追加し、データや測器の監視を容易にした。
- ② 放射照度データを用いて、波長範囲を拡張した参照スペクトルを各観測点(札幌、つくば、那覇、昭和)について計算した。相互に比較した結果、短波長側にはそれぞれの観測点に応じたオゾン全量が反映しており、長波長側ではそれ以外の観測環境、特に昭和での地表面アルベドが影響していると考えられるなど、参照スペクトルにおける相対的な特徴をとらえることが出来た。

今回の表示プログラムの改訂と新しい参照スペクトルにより、今後の定常観測で監視強化が図られるものと期待される。また、放射照度データを基に作成する参照スペクトルは、観測点や測器によらない全ての観測点の基準となる統一的な基準のスペクトルとなり得る可能性があり、これは様々な観測スペクトルを統一した基準で評価することが出来ると期待される。

謝 辞

本稿の作成に際し、昭和のデータを提供頂いた歴代南極観測隊及び南極観測事務室の方々にお礼申し上げます。伊藤真人観測第三課長には貴重な資料や助言を頂きました。また、下道正則高層気象台長を始め、観測第三課の方々には数々のご助言を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 伊藤真人・宮川幸治(2001): 二重分光光度計ブリュワーMKIIIによる紫外域日射観測. 高層気象台彙報, **61**, 5 - 28.
- 伊藤真人・能登美之・宮川幸治・上野丈夫(2000): ブリュワー分光光度計の感度監視体制と感度変化. 高層気象台彙報, **60**, 45 - 56.
- 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—オゾン層変化の伴う地上到達紫外線量の変化のスペクトル観測による評価—. 研究時報, **43**, 213 - 73.
- 気象庁(2011): 大気・海洋環境観測報告第 11 号(2009 年観測成果). 391pp.
- 気象庁(2007): 大気・海洋環境観測報告第 7 号(2005 年観測成果). 332pp.
- 小林正人・下道正則(1993): 波長別紫外域日射観測の参照スペクトルの改訂. 高層気象台彙報, **53**, 39 - 46.
- 能登美之・伊藤真人(2000): 波長別紫外域日射観測用プログラムの改訂. 高層気象台彙報, **60**, 57 - 62.
- SCI-TEC(1999): BrewerMK III spectrophotometer operator's manual(OM-BA-C231) REV B). SCI-TEC Inst. Inc., Canada, 135pp.
- 島村哲也(2011): 南極昭和基地における薄明時の波長別紫外域日射の特徴について. 高層気象台彙報, **69**, 9 - 16.
- Wester, U.(1981): A simple formula approximation of the ACGIH curve of relative spectral effectiveness of actinic UV. *RI Internal Report, Dept. of Radiation physics, Karolinska Institute, S-10401, Stockholm*, 15pp.
- WHO(2002): Global solar UV index -A practical guide-(UV インデックスの運用ガイド).