

回折格子を利用した新型紫外域分光光度計の試験結果

伊藤真人*

Some Tests Results of a New UV Spectrophotometer

Mahito ITO

Abstract

A new grating UV spectrophotometer is currently under development aiming to measure ultraviolet irradiance in the wavelength region from 200 to 400 nm. The new instrument has Si-CCD array detector and capable of measuring 960 channels simultaneously in the wavelength region. To evaluate the performance of the new spectrophotometer, some tests using spectrum lamps and NIST lamps were carried out. The summary of the results is shown below.

- 1) Scanning tests with spectrum lamps showed that the scanning accuracy was within 0.7 nm. The wavelength resolution was about 1.6 nm.
- 2) NIST lamp tests were repeated by changing the distance between the lamp and the detector surface to find the optimum distance for calibration. The result was that the calibration of this instrument could not be properly performed at the distance other than 50 cm due to stray light and dark counts. Even at the distance of 50 cm, the calibration in the wavelength region shorter than 280 nm proved to be extremely difficult because of dark counts.
- 3) Relative responsivity fluctuations during scans were about $\pm 2\%$ throughout the wavelength region from 200 to 400 nm.
- 4) Dark counts of the instrument increased as the irradiance level became higher by shortening the distance between the NIST lamp and the detector surface.
- 5) The lamp tests with and without the UV dome at the distance of 20, 30, and 50 cm clarified that the transmissivity of the dome was about 98%.
- 6) As practical operational modes for outdoor solar irradiance measurement with this instrument, the exposure time should be longer than 50 ms and the scanning over 50 times in each measurement. The UVA and UVB observations can be carried out every minute with this mode.

The problems caused by stray light and dark counts are expected to improve by furnishing with a cut-off filter and a thinner diffuser plate. Another improvement needed for practical use of this instrument may be the software to process and convert the raw data into user-friendly form depending on the purpose.

1. はじめに

気象庁における紫外域日射観測網では、ブリューワー分光光度計(以下 Brewer と呼ぶ)MKIII・MKII を利用した波長別紫外域日射観測装置や、広帯型(積分型・全天型)紫外線計を用いた観測が行なわれている(気象庁：1993, 伊藤ほか：2002)。しかし、前者については、高精度の波

長別紫外域日射観測が可能ではあるものの、高額なため一般的に普及させることは非常に難しい。後者については、測器が安価で維持管理も簡単ではあるが、その観測精度には問題がある(柴田ほか 2000, 伊藤：2003)。

そのため、汎用型の高精度な紫外域日射分光光度計の開発が望まれるようになり、最近になって、数種の回折格子型分光器を採用した測器が開発されるようになった。この種の測器は、分光した波長別紫外域日射について

*高層気象台 観測第三課

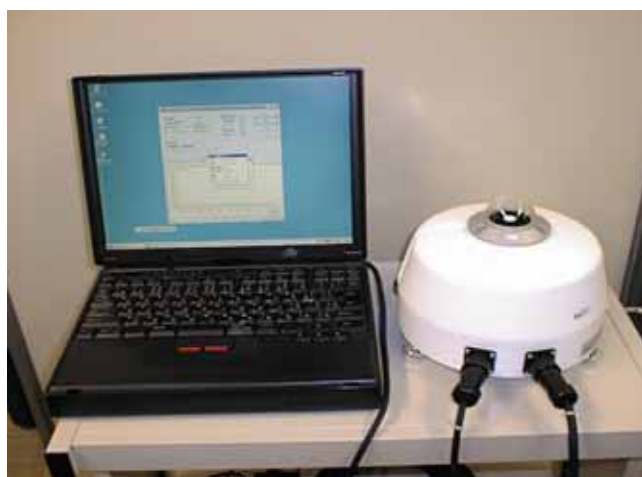


Photo.1 New UV spectrophotometer (GRUV).

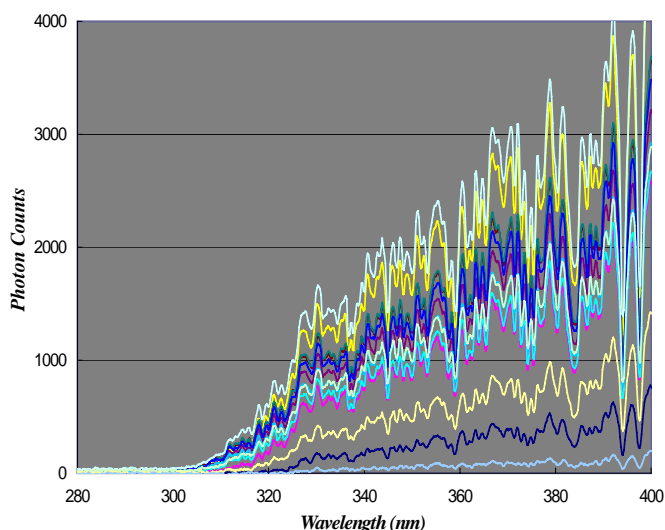


Fig.1 Example of UV spectrum by GRUV in 235 JD, 2003.

CCD による同時検出を行い、数秒毎、あるいは数分毎の観測を可能にさせたものである。しかし、観測精度や観測の限界、また測器感度常数の設定誤差等については不明な点が多い。そこで本稿では、それら測器の中の開発途中の測器について、いくつかの試験を行なう機会を得たので、その結果について報告する。

2. 測器概要

試験を行なった測器は、改良エバート型分光器を搭載した測器 (Photo.1: 仮称 GRUV) である。この分光器は、波長測定範囲: 200.11 ~ 399.81nm, 波長幅: 0.20 ~ 0.22nm, 同時測定数: 960ch, スリット幅: 50 μ m, 検出器: Si-CCD, 分解能: 1.6nm, 波長精度: 0.3nm となっている。測器は、常に 30 ± 2 に保つよう調整されている。この測器による

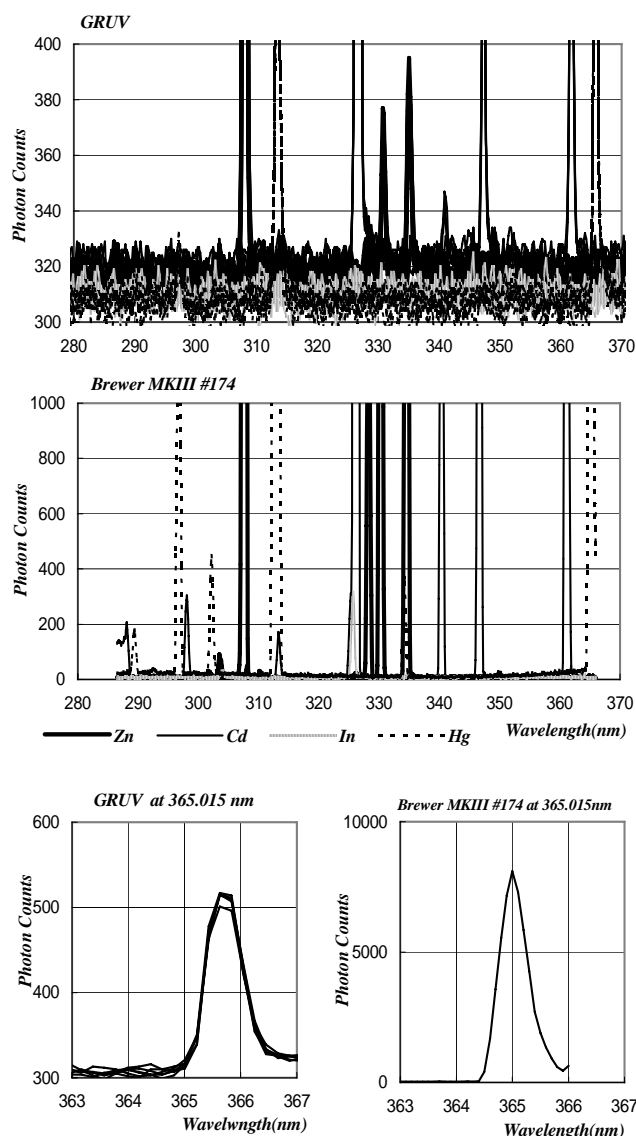


Fig.2 Spectra using Cd, Zn, In and Hg lamps and Spectrum at 360.015 nm using Hg lamp.

Upper: GRUV, Middle: Brewer MKIII #174, Lower left side: GRUV, Lower right side: Brewer MKIII #174.

観測例を Fig.1 に示す。

測定については、露光時間: 5, 10, 20, 50, 100ms, 自動の 6 種, 測定回数: 1, 10, 20, 50, 100 回の 5 種が用意されており、測定結果は g yyyy mm dd. csv ファイル (yyyy: 西暦, mm: 月, dd: 日) に収納される。一回の測定では、上記の測定を行なった後、シャッターを閉じた状態で暗計数(以下 dark 数と呼ぶ)の測定を同様の設定で実施する。ファイルには測定時刻や測器温度、それらの設定条件、波長別測定値、波長別 Dark 数が書き込まれる。なお当試験は、当台の室温 20 の校正用暗室を利用して実施した。

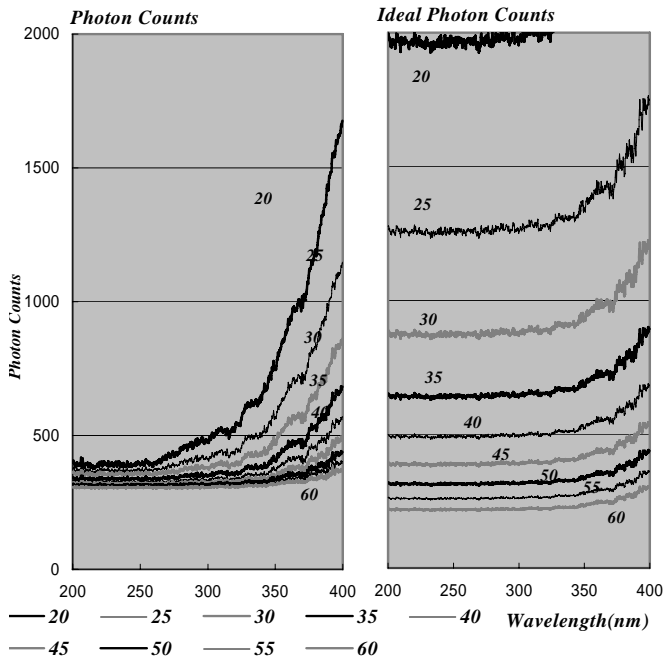


Fig.3 Photon counts spectra at the distance from 20 to 60 cm changing every 5cm.
Left side: Photon counts Right side: Converted photon counts at the distance of 50cm.

3. 試験方法と試験結果

3.1 スペクトル試験

測定波長の精度を確認するため、Cd, Zn, In, Hg の4種のスペクトルランプによる試験(伊藤ほか: 2003)を行なった。試験は、測定距離(ランプ~拡散板間): 10cm, 露光時間: 50ms, 測定回数: 50回とし、各ランプとも5走査で実施した。結果を Fig.2 上図に、また参考のため Brewer MKIII の例(伊藤ほか: 2003)を Fig.1 中図に示した。上図では、dark 補正を行なった4種のランプ試験による測定結果を重ね書きしている。また、Fig.2 下図に両測器による 365.0150nm の hg スペクトルのピーク(以下 peak と呼ぶ)の測定例を示す。

当測器は、Brewer に比べ、測器感度が低く、後述のように dark 数も多い。そのため、照度の低い peak を感知することができなかった。Brewer では 286.5~365.0nm の範囲において、これら4つのランプで24の peak が出現するが、当測器では11の peak の出現となった。特に、In ランプによる peak(Brewer では2種)は、双方とも感知できなかった。

また、当測器で感知した上記11の照度の比較的強い peak における測定波長は、長波長側に 0.6~0.7nm ずれており、若干の「波長ずれ」となっていることが判明した。この値は公称値「波長精度: 0.3nm」の約2倍に相当する。

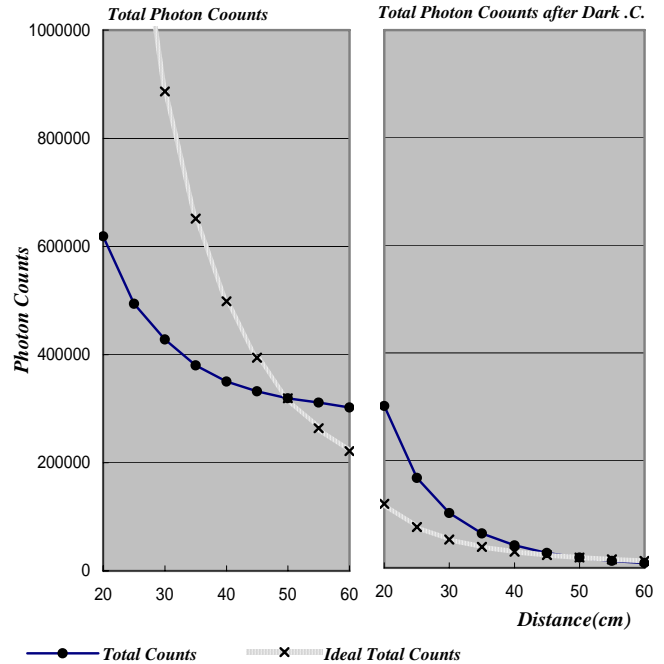


Fig.4 Total photon counts integrated from 200 to 400nm at the distance from 20 to 60cm changing every 5cm.
Left side: Total photon counts Right side: Converted total photon counts at the distance of 50cm.

さらに分解能については、Fig.2 下図の通り Brewer(0.6nm)よりも若干大きい程度で、公称値「分解能: 1.6nm」(半値幅で 0.8nm)が確認できた。

3.2 NIST ランプによる測器常数校正試験

通常、分光光度計の波長別測器感度の校正は、NIST ランプ(照度が値付けられた 1000W 標準ランプ)を使用し、50cm(ランプフィラメント~拡散板間)の照射距離で実施する。しかし、当測器についてこの校正を行なったところ、測器感度が低く、この距離では短波長側の光子計数値が dark 数と変わらないことが判明した。そこで、照射距離を変化させた試験を行い、最も適当な照射距離で校正を行なうことにした。この照射距離の試験は、

暗闇での測定 [shutter: open/close] > 距離 50cm での測定 [shutter: open/close] (以下同様) > 暗闇 > 20cm > 暗闇 > 25cm > 暗闇 > 30cm > 暗闇 > 35cm > 暗闇 > 40cm > 暗闇 > 45cm > 暗闇 > 50cm > 暗闇 > 55cm > 暗闇 > 60cm > 暗闇 > 50cm

の順序とし、暗闇状態での測定も含め、各々5回の走査とした。dark 補正していない場合の例を Fig.3 左図に示す。各距離におけるスペクトルは、5回走査の平均値とした。

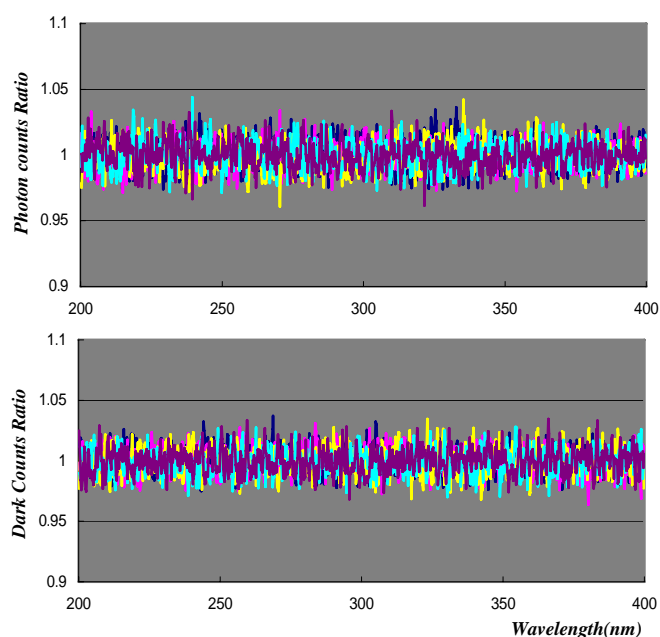


Fig.5 Relative fluctuation of spectral photon counts.

The denominator is the average of five scans.

Upper: Photon counts ratios at D=50cm.

Lower: Dark counts ratios at D=50cm.

Fig.3 左図の通り、各距離における光子計数値は、ほぼ 300nm 以下の波長帯で dark 数と識別不能となる。ただし照度の強い距離 20~30cm の場合には、270~280nm まで識別が可能であった。このように、最も照度の強い距離 20cm で NIST ランプによる校正を行なっても、270nm 以下における波長別測器感度を値付けることはできないと判明した。

いっぽう、NIST ランプは 50cm で照射させることになっているが、他の距離でも「照度」対「距離」の関係が保持できるならば(Brewer の場合は 40~55cm の範囲で可能)、他の距離で得られた波長別感度を補正して使用することができる。Fig.3 右図に 50cm の光子計数値を基準とした場合の他の各距離における換算した波長別光子計数値を示す。この右図と実際に測定した左図とを比べると、全ての距離において測定値が換算値に比べ大きく異なる。

この現象は、dark 補正を行なった場合でも、積算値(200~400nm)とした場合でも、値は異なるものの同様である。この積算値の場合の結果を Fig.4 に示す。したがって、当測器では照射距離 50cm 以外の距離における校正は不適であると判明した。

3.3 波長別測定誤差

一回の走査における波長別光子計数値の測定誤差について、3.2 のデータをもとに検討した。各照射距離にお

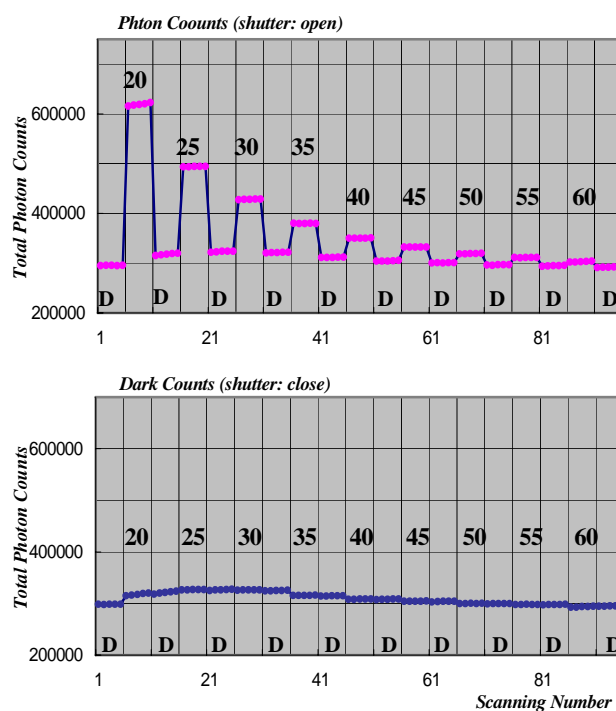


Fig.6 Total photon counts and total dark counts at the distance from 20 to 60 cm every 5 cm.

Upper: Total photon counts with shutter open.

Lower: Total dark counts with shutter close.

ける光子計数値と dark 数について、それら 5 回走査の波長別平均値を基準とし、それらの波長別光子計数比と dark 比を求めた。Fig.5 上図に照射距離 50cm の波長別光子計数比の例を、Fig.5 下図に同じ 50cm の波長別 dark 比の例を示す。

図に示されるように、50cm の場合でも dark の場合でも、波長別測定誤差はおおよそ $\pm 2\%$ となる。ただし、この値は、強い照射によっておおよそ 600counts 以上の計数値となった場合、 $\pm 1\%$ と少なくなる。それ以外では dark 数も含め、変わりがない。

3.4 Dark に関する試験

3.2 のデータをもとに、ランプ照射時の dark 数と暗闇における dark 数について検討した。各試験での波長別に見た dark 比は、どの場合でもほとんど変化がないので、ここでは 200~400nm の各積算値について比較する。3.2 の試験順序による各積算光子計数値を Fig.6 上図に、各積算 dark 数を Fig.6 下図に示す。

このように、ランプを照射しているときの dark 数は、照射強度が強いほど多い。これは、測器がカットオフフィルターを用いないモノクロメーターの場合に共通する

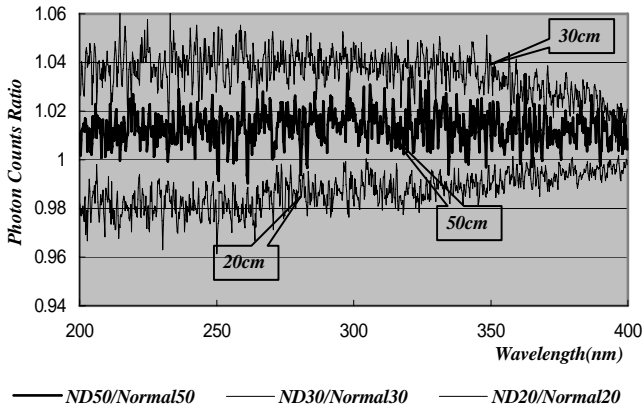


Fig.7 Photon counts ratios (without UV-dome / normal).

傾向で、迷光の影響やその温度依存性に起因すると考えられている。いっぽう、距離 30cm 以下の強強度になると逆に減少傾向となる。この原因については、今のところ判っていない。

いっぽう、暗闇での光子計数値を測定したところ、その値はどの照射距離でも、そのときの dark 数より約 300counts 少ないことが判った。この原因については、おそらく測器内部のサンプリング時間等の問題ではないかと考えられるが、詳細は判っていない。

3.5 UV-ドーム透過試験

UV-ドームの透過率を把握するため、ドームの有無による試験を照射距離 20, 30, 50cm の場合で実施した。結果を Fig.7 に示す。図では通常の場合(ドーム有)を基準とし、ドームを除去した場合の上記 3 例について波長別計数比で表示した。

ドームを除去した場合、距離 50cm で 1~2%の増加(透過率：98~99%)、距離 30cm で 2~4%の増加(透過率：96~98%)、距離 20cm では逆に 0~2%の減少(透過率：100~102%)となった。このように、測定結果は高い透過率を示しており、UV-ドームに関しては問題ないと言える。

しかし、距離によって異なる値が出現したことは、距離試験の結果にも現れたように、50cm 以外での測定値が、その照度に応じた(比例した)値にならないことと同調する。また、距離 20cm で逆に減少したことは、検定装置からの光束が、距離を近づけすぎたために制御できなかった可能性も高いが、今のところ詳細は判っていない。

3.6 露光時間・測定回数に関する試験

複数用意されている露光時間と測定回数について、それらの理想的な設定値について検討した。試験は、NIST ランプを使用し、照度の強い照射距離 30cm で行なった。

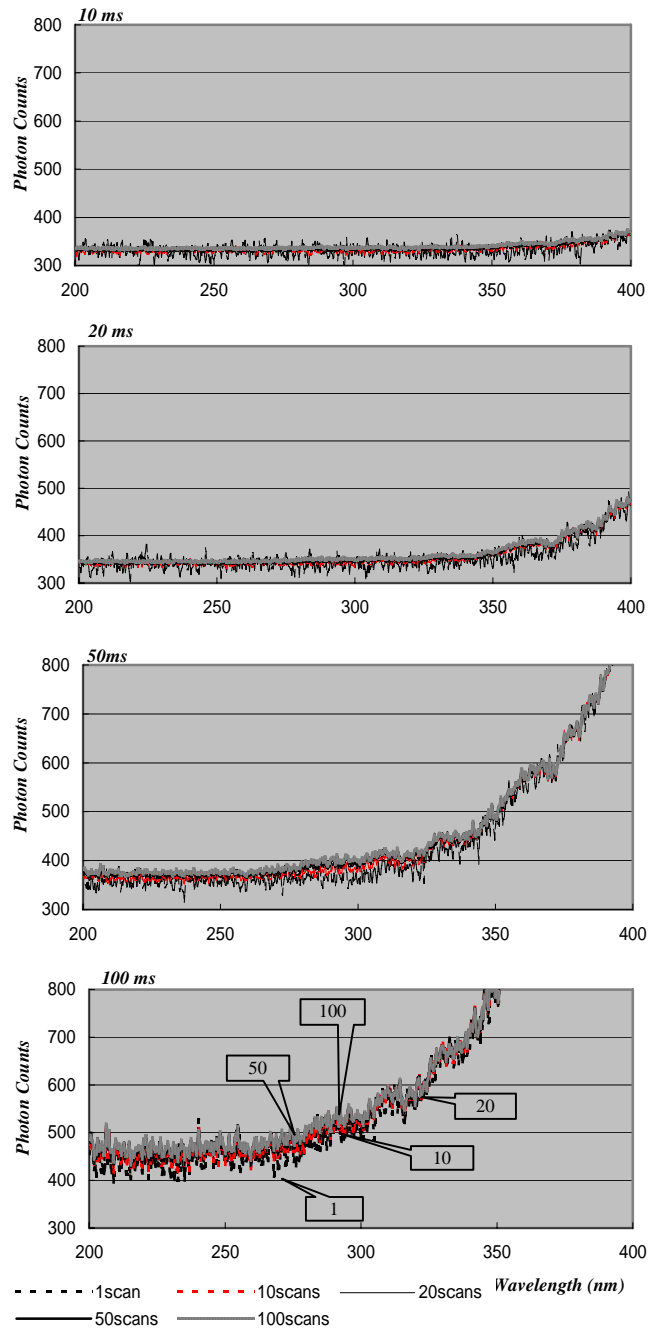


Fig.8 Photon counts experiments under various exposure time (10, 20, 50 and 100ms) and scanning number (1, 10, 20, 50 and 100scans).

測定は、

露光時間：5, 10, 20, 50, 100 ms の 5 種
について、それぞれ

測定回数：1, 10, 20, 50, 100 回 の 5 種
で実施した。走査はそれぞれ 5 回走査し、その平均値を比較した。10, 20, 50, 及び 100ms の例を Fig.8 に示す。その結果、露光時間・測定回数については、その時間

や回数大きさに比例して光子計数値が変わるものではないこと(例: 50ms の場合は 10ms の 5 倍とならない)が明らかになった。

露光時間については、測定回数を 100 回とした場合、3.2 の距離試験の場合と同様、上記の照射距離では、

- 5ms : 全波長域で計測不能
- 10ms : 波長 370nm 以上で計測可能
- 20ms : 波長 330nm 以上で計測可能
- 50ms : 波長 290nm 以上で計測可能
- 100ms : 波長 280nm 以上で計測可能

という結果となった。しかし、測定回数が少なくなればなるほど、全 5 回走査の波長別誤差は大きくなった。

以上より、露光時間、測定回数ともに多いほど計測精度は高くなるが、上記の照射強度では少なくとも 50ms 以上の露光時間で 50 回以上の測定回数が必要となった。

4. まとめと今後の処置

本試験結果は、以下の通りにまとめられる。

- (1) スペクトルランプ照射試験により、当測器は波長精度(最大波長ずれ) 0.7nm、分解能約 1.6nm (半値幅で 0.8nm)という結果を得た。
- (2) NIST ランプによる照射距離試験では、どの距離においても 280nm 以下の短波長域における波長別測器感度を決定することはできない。また、規定の 50cm 以外での照射距離における測定値から、距離補正法によって波長別測器感度を決定することも不可能である。これらの結果は、dark 補正した場合でも、積算値として算出した場合でも同様である。
- (3) 一回の走査の波長別測定誤差は、どの波長域でもおよそ $\pm 2\%$ である。
- (4) dark 数については波長依存性が認められないが、照射強度が強いほど増加する。しかし、照射距離 30cm 以下の強い強度になれば逆に減少する。また、暗闇での光子計数値は、そのときの dark 数より少ない値となる。
- (5) UV-ドームの透過率は照射距離で異なるが、距離 50cm で 98~99%と高い値を示した。
- (6) 露光時間は 50ms 以上、測定回数も 50 回以上の設定で計測することが望ましい。ただし、それらの設定でも 290nm (100ms の場合は 270nm)以下の計測は不能である。

以上のように、当測器については、この種の測器とし

て UV-ドームの材質や測器内部の温度制御は充分であり、波長精度や分解能にも大きな問題はなかった。また露光時間と測定回数の試験により、前記(6)の設定で測定すれば、UVB 領域と UVA 領域の波長別紫外域日射の毎分観測が可能となる。

いっぽう現状では、NIST ランプ検定により波長別測器感度を校正しても、実際の観測では大きな誤差が生じる可能性がある。これは、照度の異なる光を照射した場合、測器内部の迷光量が大きく変化し、その結果、測器感度が変化してしまうと推察されるからである。この種の問題は、既成の広域型(全天型)紫外線計にも認められることが知られている。

この問題点の解消のためには、分光器を二重分光型のものに変更することが望ましい。しかし、経済性からこの変更ができない場合には、1) 測器感度を上げるための拡散板の改良、2) 迷光を減少させるカットオフフィルターの装着、が必要と考えられる。特に後者 2) のフィルターについては、温度依存性が低く、長期間にわたり感度変化しにくい材質のものを選ぶ必要がある。また、データ解析面からは、3) 分光波長を 300nm, 310nm...といった単純な値に揃えるようなソフトの開発、が必要と思われる。今後、これらの改良を経て、高精度で経済性に優れた汎用型紫外域分光光度計の完成が望まれる。

謝 辞

本稿を草するに際し、当測器の試験について快諾していただいた開発会社の担当の皆様、本論に対して多くのご助言を賜った気象研究所気象衛星・観測システム研究部の廣瀬保雄主任研究官、これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 伊藤真人・佐藤 健・下木原卓也・平良 修・宮川幸治 (2002): 新型ブリューワー分光光度計 MKIII の測器調整・校正結果 - 測器整備と各官署への設置 - . 高層気象台彙報, 62, 45 - 52 .
- 伊藤真人(2003): 全天型(広帯型)紫外域日射計の高度角・方位角特性. 高層気象台彙報, 63, 41 - 50 .
- 伊藤真人・Vladimir Savastiouk・Michael 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 .
- 気象庁(1993): 紫外域日射観測指針. 気象庁, 83pp .
- 柴田誠司・伊藤真人・能登美之・上野丈夫・岡本利次 (2000): 全天型紫外域日射計の感度変化と測定精度. 高層気象台彙報, 60, 17 - 24 .