

広帯域紫外域日射計用 分光特性検査装置の開発とその精度

伊藤 真人*・下島 淳彦**

Spectral Sensitivity Calibration System for Broadband UV Radiometer using iHR320 Spectrometer

Mahito ITO and Atsuhiko SHIMOJIMA

Abstract

The Aerological Observatory developed a new spectral sensitivity calibration system for broadband UV radiometers in the Japan Meteorological Agency (JMA) network. The system consists of an NIST lamp unit, a deuterium lamp unit, fore-optics, an iHR spectrometer, and rear-optics. NIST tungsten-halogen 1000W DXW and FEL lamps or a 30W deuterium lamp can be selected as the light source. A GR600 (GR1200) grating for UV produces light at a wavelength of 150 to 3000nm (150 to 1500nm), using minimum drive step size of 0.002nm. The theoretical spectral resolution depends on the kind of grating and slit width, (e.g. the theoretical spectral resolution is 2.5nm wavelength when GR600 was used at 0.5mm in slit width).

Tests using the system clarified the following. 1) Grating tests: UVB (UVA) outputs of a broadband UV radiometer (UV-S-AB-T) using GR1200 decrease 33% (25%) compared to the output using GR600; 2) Slit width tests: UVB (UVA) outputs can be produced by slit widths from 0.5 to 2.0mm (1.0 to 2.0mm); 3) Slit height tests: Outputs were recognized only at a slit height of open (15mm); 4) Lamp irradiance tests: High UVB and UVA irradiances are produced by FEL type NIST lamps; the deuterium lamp cannot be used in the UVA output test; 5) Wavelength position accuracy test: The wavelength position shifted less than 2nm when GR1200 was used. The GR1200 scanning by the spectrometer needs “calibrate menu” must be calibrated every time before tests.

The spectral sensitivity of the UV radiometer was determined by the system as followings. Spectral irradiances of the system could be calculated every 1nm (± 0.5 nm) from 280 to 400nm wavelength by scanning using the Brewer MKIII Spectrophotometer. The spectral irradiances produced remarkable spectral sensitivity of UV radiometer UV-S-AB-T (peak sensitivity at a wavelength of 301.0nm for UVB scanning and 359.0nm for UVA scanning). UVB responsivity of the instrument calculated by the spectral sensitivity was consistent with the value determined by NIST lamp calibration, but UVA responsivity differed by about 15%.

1. はじめに

広帯域紫外域日射計は、UVB(280~315nm)や UVA(315~400nm)の全天紫外域日射量を積分値として測定する測器である。この種の測器は、ブリューワー分光光度計(Kipp & Zonen : 1999, 伊藤・宮川 : 2001)や回折格子型全天紫外域日射計(伊藤 : 2004)等の分光型測器に比べ、取り扱いが簡単で比較的安価なため、世界的に広く使用されている(WMO : 2004)。気象庁においても当台や南極昭和基地で使用している(気象庁 : 1993)。しかし、測器感度が経年的

に変化し、高度角・方位角特性や分光特性も測器により異なることから、測器常数の高精度な校正を行うことができなかった。

従来、当台の広帯域紫外域日射計の校正では、NIST ランプ(米国標準技術研究所 National Institute of Standard and Technology で照度が付けられた 1000W Tungsten-Halogen Lamp : 以下 NIST ランプと記す)の照射による検定と監視、およびブリューワー分光光度計との測器相互比較(柴田ほか : 2000)、外部標準ランプ点検装置による日々の測器感度トレンドの把握(伊藤・高野 : 2006)、また高度角・方位角特性試験(伊藤 : 2002, 2003)等を行ってきた。しかし、拡

*高層気象台 観測第三課 ** (株)堀場製作所

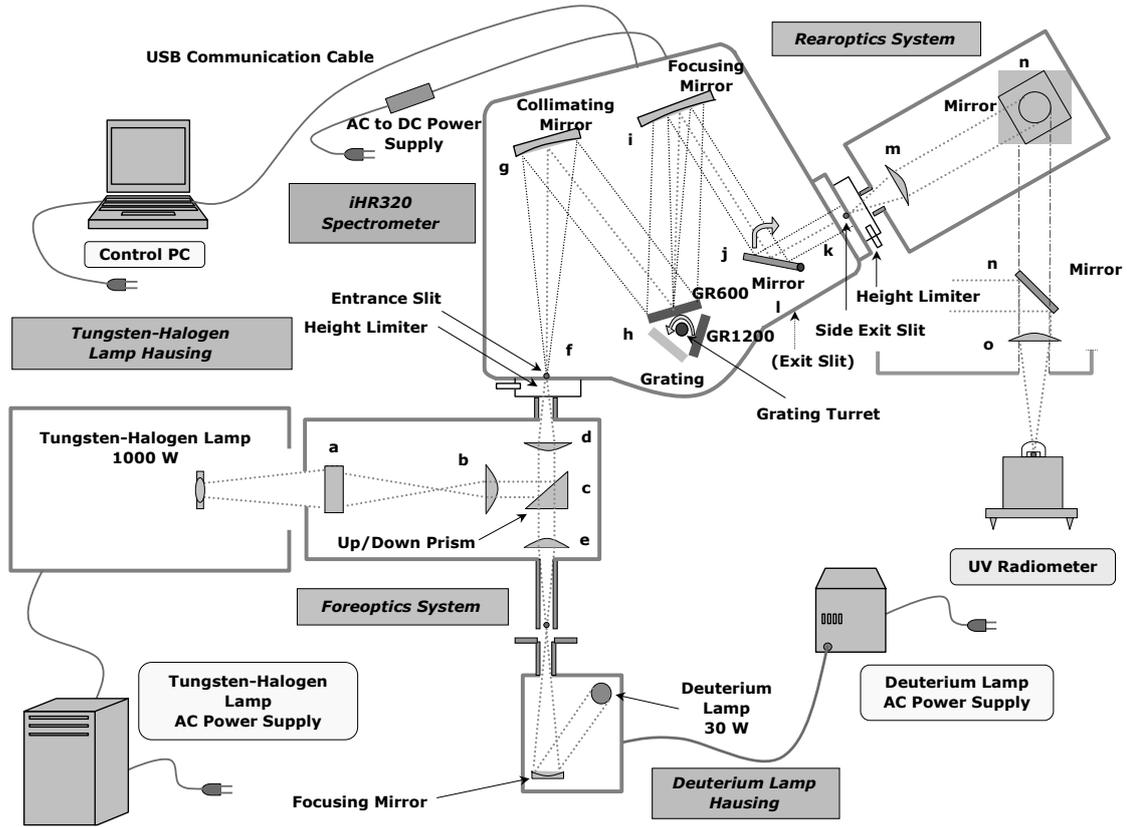


Fig. 1 Spectral sensitivity calibration system using iHR320 spectrometer.

散板やフィルターの分光特性の把握が難しく、広帯域紫外域日射計の経年変化の原因特定は高精度の分光照射装置がなく、従来どおりの特性把握に頼らざるを得なかった。

いっぽう、世界気象機関(WMO)の紫外線に関する科学諮問部会(UV-SAG)では、世界紫外線計校正センターの設立に際し、標準ランプによる測器感度の検定や監視、基準器との比較、高度角・方位角特性ばかりでなく分光特性も把握しなければならないと報告した(WMO: 1998, 2004)。また、分光特性を把握するための検査装置は、分解能 2nm 以下の分光光を 1nm 以下の波長幅で照射させ、例えばキセノンランプ(Xenon Arc Lamp)を光源とし、波長 240~400 nm で走査するものとしている。

このように、広帯域紫外域日射計を用いた紫外域日射観測網の充実と得られる紫外域日射データの高品質化には、紫外域日射計の分光特性を高精度で測定する装置の開発が、国内外で強く望まれている。そこでランプ光源からの光を高精度の分光器で分光させ、その分光光を測器に照射する分光特性検査装置を開発した。本稿ではこの装置を紹介するとともに、その精度の試験結果について報告する。

2. 分光特性検査装置

2.1 概要

今回開発した分光特性検査装置(以下、検査装置と呼ぶ)は、光路順に 1) NIST ランプ装置(Tungsten-Halogen Lamp Hausing)と 2) 重水素ランプ装置(Deuterium Lamp Hausing), 3) 前置光学系(Foreoptics System), 4) 分光器(iHR320 Spectrometer), 5) 後置光学系(Rearoptics System), に区分される。これらの全容を Fig.1 と Photo.1 に示す。

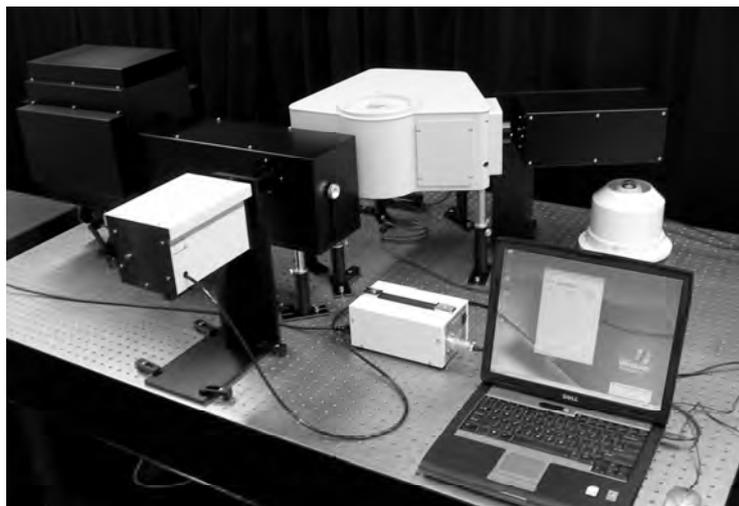
1)の NIST ランプ装置は従来の装置を改良し、3)の前置光学系と 5)の後置光学系は当装置専用に新規製作した。4)の分光器と 2)の重水素ランプ装置は市販品を利用した。これらは全てキャスター付きの光学定盤上に設置しており、移動が可能である。

2.2 NIST ランプ装置

NIST ランプ装置は、ランプハウス、光学ベンチ、電源等で構成される。

ランプハウスは、1000W タングステン・ハロゲンランプの両口型 DXW ランプと片口型 FEL ランプの 2 種類を用意し、ランプホルダについては、光路の長さを変えられるよう前後に移動可能とした。ランプハウスを乗せる光

(a)



(b)



Photo. 1 Spectral sensitivity calibration system using iHR320 spectrometer.

(a) Overview of the system. (b) Inside the iHR spectrometer.

学ベンチは上下稼働が可能で、光軸の高さを自由に調整できる。

電源は、Takasago DC power supply の IPSO 130-10 を使用し、8.000A 制御とした。

2.3 重水素ランプ装置

重水素ランプ装置は、Horiba Jobin Yvon Inc.のランプハウスとアダプタ(LSH-D, LSH-A270)、浜松フォトニクス社の重水素ランプ用電源(C9598-1035)、同 30W 重水素ランプ(L2D2)で構成される(Horiba Jobin Yvon : 1996)。これらの主な仕様を Table 1 に示す。ランプハウスは、内部の凹面鏡(Focusing Mirror)によりランプの光を集光し、ランプハウス出口から92mmの位置(アダプタを含む)で焦点が結ぶように設計されている。

この重水素ランプについては、紫外域日射領域の短波長側で強い照度(波長 225nm 付近で最大)を持つため、長波長側で強い照度を持つNISTランプによる照射試験を補う目的がある。

2.4 前置光学系

前置光学系(Foreoptics System)は、Fig.1 に示す通り右端の直角プリズム(図中 c)を上下することにより、NIST ランプもしくは重水素ランプの光を選択して分光器に照射するよう設計されている。

NIST ランプ側の光路には、集光用の平凸組レンズ(図中 a)とコリメート用平凸レンズ(図中 b)がある。これらは、光学ベンチ上で左右に移動が可能で、ランプの種類や位置により、最大照度が得られる位置に調整することができる。

Table 1 Deuterium lamp unit

Lamp Housing	
Type (SN)	Horiba Jobin Yvon Inc. LSH-D
Light source	30W Quartz envelope
Focused image size	1.8mm φ
Aperture	F/4.5
Spectral range	185-400nm
Adapter Type (SN)	Horiba Jobin Yvon Inc. LSH-A270
Power Supply	
Type (SN)	Hamamatsu Photonics K.K. C9598-1035 (SD0122)
Deuterium Lamp	
Type	Hamamatsu Photonics K.K. L2D2 Lamp L6308

Table 2 iHR320 spectrometer

Spectrometer	
Type (SN)	Horiba Jobin Yvon Inc. iHR320 (0147-03-07)
Focal length	320 mm
Entrance aperture ratio	F/4.1
Spectral range (GR1200)	150 nm to 1500 nm with 1200 gr/mm grating
Spectral range (GR600)	150 nm to 3000 nm with 600 gr/mm grating
Grating size	68 mm x 68 mm
Number of grating on turret	3
Flat field size	30 mm x 12 mm
Spectral resolution	0.06 nm
Wavelength position accuracy	±0.20 nm
Wavelength repeatability	±0.075 nm
Spectral dispersion (GR1200)	2.35 nm/mm with 1200 gr/mm grating
Spectral dispersion (GR600)	4.70 nm/mm with 600 gr/mm grating
Magnification	1.1
Stray light	5×10^{-4}
Scan speed	159 nm/s (increasing wavelength)
Minimum drive step size	0.002 nm
Computer interface	USB 2.0 (USB 1.1 Compatible)
Optical axis height	98.43 mm
Nominal weight (Size)	20 kg (Length:417, Width: 422, Height: 192mm)

b のコリメート用平凸レンズから先の光路では、ランプ光は平行光となり、上下移動が可能な UV 透過用の直角プリズム(Up/Down Prism : 図中 c)で 90°屈曲し、前置光学系出口直前の平凸レンズ(図中 d)により分光器の入口スリット(Entrance Slit : 図中 f)へ集光する。

重水素ランプ側の光路にはコリメート用平凸レンズ(図

Table 3 Theoretical spectral resolution of iHR320

Slit Width (mm)	GR: 600 grooves/mm	GR: 1200 grooves/mm
	Central wavelength: 300 nm	Central wavelength: 330 nm
0.01	0.050	0.024
0.05	0.250	0.120
0.1	0.500	0.241
0.2	1.000	0.481
0.3	1.501	0.722
0.4	2.001	0.963
0.5	2.501	1.204
0.6	3.002	1.444
0.7	3.502	1.685
0.8	4.002	1.926
0.9	4.503	2.167
1.0	5.003	2.408
2.0	10.009	4.817
5.0	25.037	12.058

(nm) (nm)

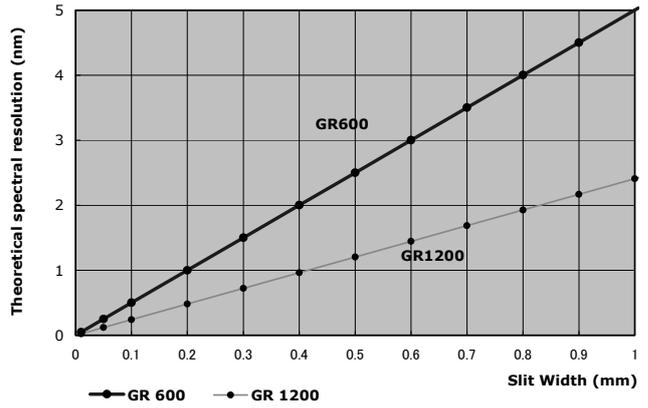


Fig. 2 Theoretical spectral resolution of iHR320

中 e)があり，ランプ光はここで平行光となり，前置光学系出口直前の平凸レンズ(図中 d)で分光器の入口スリットへ集光する．この光路を使用するときは，直角プリズムを下方(Fig.1 では紙面奥)に移動させて光路より外す．

2.5 分光器

分光器は，Horiba Jobin Yvon Inc.の iHR320(Horiba Jobin Yvon : 2007a, 2007b)で，主な仕様を Table 2 に示す．

Fig.1 の通り，前置光学系からの光は，入口スリット(Entrance Slit : 図中 f)から器内に入り，凹面鏡(Collimating Mirror : 図中 g)で平行光として反射し，回折格子(Grating : 図中 h の GR600 または GR1200)で分光される．その後，分光された光は，先の凹面鏡よりもやや大きい凹面鏡(Focusing Mirror : 図中 i)で再度平行光となって反射し，反射鏡(Mirror : 図中 j)を経て側面出口スリット(Side Exit Slit : 図中 k)へ導かれる．この回折格子における分光の波長選択は，制御 PC(Control PC)により回折格子を回転させて行う．なお，当分光器で分光強度を直接測定するには，上記の反射鏡(図中 j)は使用せず，2 番目の凹面鏡から反射鏡後方の出口スリット(Exit Slit : 図中 l)へ直接出射させ，そこに取り付けられた検出器(CCD)により測定する．今回，これらの出口スリットや検出器については装備していない．

分光器内の回折格子ホルダ(Grating Turret)には 3 種類の回折格子を装着させることができる．現在は，

- 第 1 位置 : Blaze 波長 300nm の GR600
- 第 2 位置 : Blaze 波長 330nm の GR1200
- 第 3 位置 : 装着なし

とし，2 種類の紫外域日射用の回折格子を装着させている．その装着位置については，基本的にどこでもよい．分光波長の選択は，GR600 で「150~3000nm」の範囲を，GR1200 で「150~1500nm」の範囲を自由に選ぶことができる．ただし，点検では 0±5nm 付近も使用する．回折格子の最小

送りステップは 0.002nm で，別の回折格子を装着させれば，12000nm まで計測が可能である．

入口スリット f と側面出口スリット k は，ともにスリット幅(Slit Width)とスリット高(Slit Height)を変えることができる．スリット幅の変更は制御 PC で行い，スリット高の変更は手動で行う．スリット幅は，0.0~2.0mm の範囲で自由に設定が可能で，スリット高は，「Close」，「1mm」，または「Open(15mm)」のいずれかを設定する(通常は「Open(15mm)」)．また，入口スリットと側面出口スリットのスリット幅については，通常，同じ値に設定する．

当分光器の波長分解能(Spectral Resolution)については，最大で 0.06nm であるが，これは回折格子の種類，スリット幅により異なる．当装置で整備した GR600 と GR1200 の理論分解能(Theoretical Spectral Resolution)を計算した結果を Table 3 と Fig.2 に示す．例えば，回折格子 GR600 を使用してスリット幅(Slit Width)を 0.1mm とした場合，分解能は 0.5nm，同じ回折格子でスリット幅を 1.0mm とした場合，分解能は 5.0nm となる．このように，刻線数の多い回折格子を使用し，小さいスリット幅に設定すれば，高い分解能が得られる．しかし 4.3 で後述するように，高い分解能に設定すると，当装置からの照射照度が低くなり，検査対象測器からの出力を測定することができなくなる．

当分光器を制御するソフトウェアは，USB2.0 制御の「USB Spectrometer Control」で，Microsoft Windows XP(TM)上で動作する．

2.6 後置光学系

後置光学系(Rearoptics System)では，Fig.1 の通り分光器の側面出口スリット(図中 k)から照射された光は，コリメート用平凸レンズ(図中 m)により平行光となり，反射鏡(図中 n)でその光路は鉛直方向(下方)に導かれる．その後この

光は、後置光学系出口付近の平凸レンズ(図中 o)により、検査対象測器の感部(UV-ドームの拡散板)へ集光する。そのため、検査対象測器は、このレンズの焦点位置に感部が位置するように設定する。

3. 測定方法

3.1 分光器の作動手順

測定では、先ず制御用ソフトウェア「USB Spectrometer Control」を作動させ、回折格子の種類やスリット幅などの作動条件を設定した後、目的の照射させる波長を入力する。この制御用ソフトウェアの画面を Fig.3 に示す。具体的な作動手順は以下の通りである。

初期手順

- 1 iHR320 の電源 ON
- 2 USB Spectrometer Control プログラム起動
- 3 IHR320 の Initialize(約 1分)

作動条件設定

- 4 Grating 設定……「600, 300nm」か「1200, 330nm」を選択(通常は前者。変更した場合の設定時間は約 2分)
- 5 Exit 設定……「Front」から「Side」に変更(数秒で切換終了)
- 6 Entrance 設定……「0.1」「0.5」「1.0」mm 等に設定(数秒で設定終了)
- 7 Side 設定……「0.1」「0.5」「1.0」mm 等、Entrance の設定値に合わせる(数秒で設定終了)
- 8 Position, nm 設定……目的の波長「300」nm を入力
- 9 Increment 入力……波長幅を入力(波長を直接入力してもよい)

測定手順

- 10 任意の波長選択……上記 8 および 9 を設定(ただし波長選択において分光制御の関係により、例えば 300.0 nm の設定は 299.9nm 等に 0.1nm 程度ずれる場合がある)

終了手順

- 11 USB Spectrometer Control プログラム終了(画面右上の「x」か「Exit」で終了)
- 12 iHR320 電源 OFF

その他、Reinitialize は「ソフトの初期設定」であり、Force をチェックし Reinitialize を行った場合は「ハードの初期設定」となる。なお前述した初期手順 3 の Initialize は、「ソフトとハードの双方の初期設定」である。

また、波長ずれが確認された場合には、Fig.3 の画面左上の File より Calibrate を選択し、右下図の Calibrate Monochromator の画面で、現状位置におけるそのときの正しい

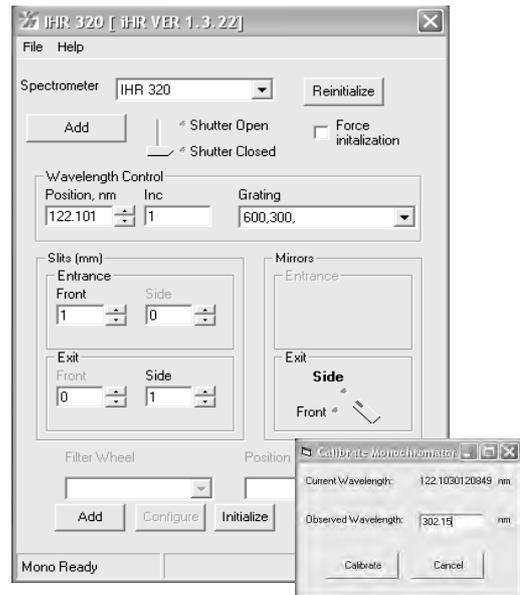


Fig.3 Display of USB spectrometer control for iHR320 spectrometer.

波長(nm)を入力すれば、波長ずれの差を全領域にわたって補正することができる。この補正值は、回折格子毎に記録され、次の走査において再設定の必要はない。

3.2 検査対象測器の設置

検査対象測器の設置は、後置光学系からの焦点位置が分光装置の筐体面より 95mm 下にあるので、検査対象測器の UV-ドーム内の拡散板がこの位置になるように距離を設定する。このとき、分光器を作動させ、波長を 0nm に設定すれば、回折格子が鏡と同じ役目を果たし、可視光が拡散板上に映るので、おおよその位置を決めることができる。その後、検査対象測器の出力をマルチメータに表示させ、出力が最大となるよう検査対象測器の位置を調整する。

4. 各種照射試験

4.1 試験の概要

当装置全体の精度を把握するため、ランプの照射強度を考慮しながら、回折格子、スリット幅、スリットの高さ(以下、スリット高と呼ぶ)等についての試験を試みた。これらの試験は、室温一定(20°C)の検定用暗室で実施した。結果は以下の通りである。

4.2 回折格子

今回整備した回折格子 GR600 と GR1200 の 2 種について、同じ条件の下、検査対象測器の出力にどの程度違いがあるかを試験した。

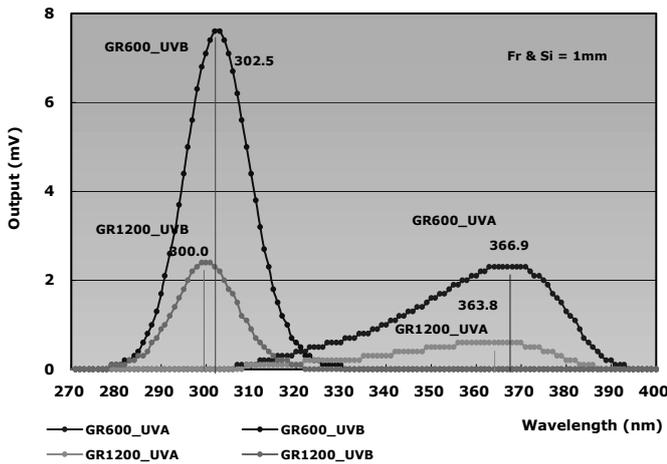


Fig. 4 Outputs (mV) of UVSABT 030-620 in grating test. Grating: GR600 and GR1200. Slit width: 1mm. Slit height: open (15mm). Light source: DXW NIST lamp.

検査対象測器を紫外域日射 B 領域と A 領域(以下これらの出力を UVB と UVA と呼ぶ)を測定できる A 社の UV-S-AB-T (測器番号: 030-620, 以下 UVSABT と呼ぶ)とし, 入口スリットと側面出口スリットの幅(Fr と Si)を 1mm, スリット高は「Open」, ランプは DXW 型(両口型)NIST ランプ(ランプ番号: S-1017)と重水素ランプの 2 種とした. 測定は, 分光波長 270~405nm の範囲を波長幅 1nm で走査した. また測定の前後に暗計数(以下 Dark と呼ぶ)を測定し, 出力値を補正した. これらの条件の場合, 波長分解能の理論値は Table 3 から, GR600 で 5.0nm, GR1200 で 2.4nm となる. NIST ランプを照射した結果を Fig.4 に示す.

図に示されるように, UVB の最大出力(以下, ピーク値と呼ぶ)は, GR600 の場合に 302.5nm で約 7.6mV, GR1200 の場合に 300.0nm で約 2.5mV となり, GR1200 の場合は GR600 の場合の約 1/3 に減少した.

いっぽう UVA のピーク値は, GR600 の場合に 366.9nm で約 2.3mV, GR1200 の場合に 363.8nm で約 0.6mV となり, UVB の場合と同様に出力は約 1/4 に減少した.

このようにピーク位置の波長は GR600 と GR1200 との間で UVB が約 2.5nm, UVA が約 3.1nm ずれている. これは 4.6 で記述するように, GR1200 の走査で波長ずれが生じたためである.

重水素ランプを照射した結果(図省略)については, ランプスペクトルが異なるのでピーク位置に差が生じるが, UVB の領域ではほぼ同じ傾向となり, UVA の領域では重水素ランプが紫外域の長波長側で照度が弱いため, 十分な出力を得ることができなかった. また UVB のピーク位

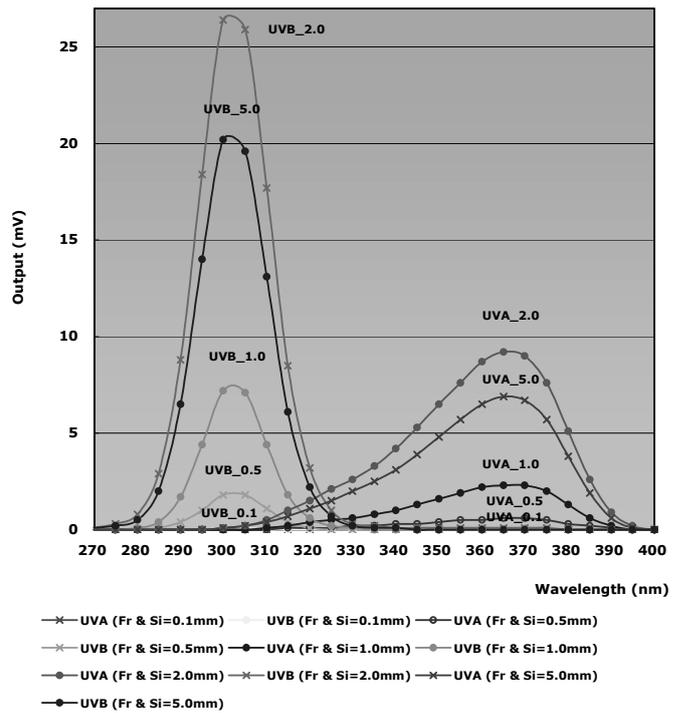


Fig. 5 Outputs (mV) of UVSABT 030-620 in slit width test. Slit width: 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 and 5.0mm. Slit height: open (15mm). Grating: GR600. Light source: DXW NIST lamp.

置の波長については, NIST ランプと同様, GR600 と GR1200 との間で約 2.4nm の波長ずれが認められた.

以上のように, 波長分解能は GR1200 の方が良いが, これを使用した場合, 波長ずれを起し, 出力も弱くなるということが明らかとなった.

4.3 スリット幅

入口スリット f と側面出口スリット k の幅を変化させ, 波長別の出力特性について試験した. 検査対象測器, NIST ランプ, スリット高は 4.2 と同様で, 回折格子は GR600 とし, 変更したスリット幅は, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0mm および設定範囲外の 5.0mm の 5 種類とした. これらの理論分解能は, 順に 0.5, 2.5, 5.0, 10.0, 25.0nm である. 測定方法については, 分光波長 270~405nm の範囲を波長幅 5nm 走査とし, 出力値に Dark 補正を施した. 結果を Fig.5 に示す.

図に示されるように, UVB のピーク位置はどの場合も波長 302.0nm となるが, そのピーク値は, スリット幅 2.0mm で約 26.5mV, 5.0mm で約 20.3mV, 1.0mm で約 7.4mV, 0.5mm で約 1.8mV となり, 0.1mm では検出限界程度の出力であった.

UVA はどの場合も波長 367.0nm でピークとなり, その

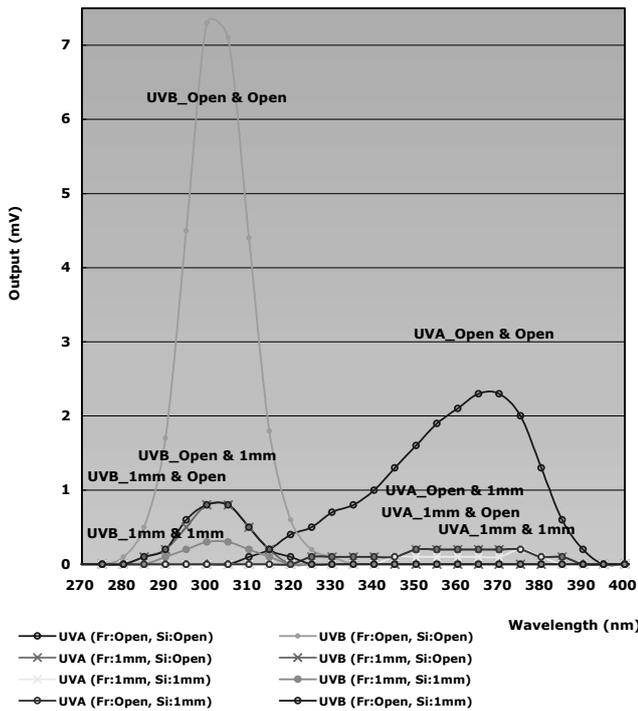


Fig. 6 Outputs (mV) of UVSABT 030-620 in slit height test. Slit height: open (15mm) and 1mm. Slit width: 1mm. Grating: GR600. Light source: DXW NIST lamp.

ピーク値は、スリット幅 2.0mm で約 9.2mV、5.0mm で約 7.9mV、1.0mm で約 2.3mV、0.5mm で約 0.7mV となり、0.1mm では UVB と同様、出力は認められなかった。また 0.5mm の場合についてはピークが出現するものの、出力が低いと明瞭ではない。

スリット幅を変化させた試験結果から、スリット幅 2.0mm 以内の測定が望ましく、UVA のピークを得るためには 1.0mm 以上のスリット幅が必要であると判明した。また、設定範囲外のスリット幅 5.0mm の出力が 2.0mm の出力より低い原因は、5.0mm の場合にはスリットが開口限界で停止しているのではなく、逆に狭くなる方向へ移動したためと推定される。

4.4 スリット高

スリット高を変化させて、波長別の出力特性を試験した。検査対象測器と NIST ランプは 4.2 と同様で、回折格子は GR600 とし、スリット幅は 1.0mm とした。この理論分解能は、5.0nm である。変更したスリット高は、「Open : 15mm」と「1mm」の 2 種であるが、確認のため、入口スリットと側面出口スリットの高さを同一にしない場合も試験した。測定方法については、4.3 と同様とした。結果を Fig.6 に示す。

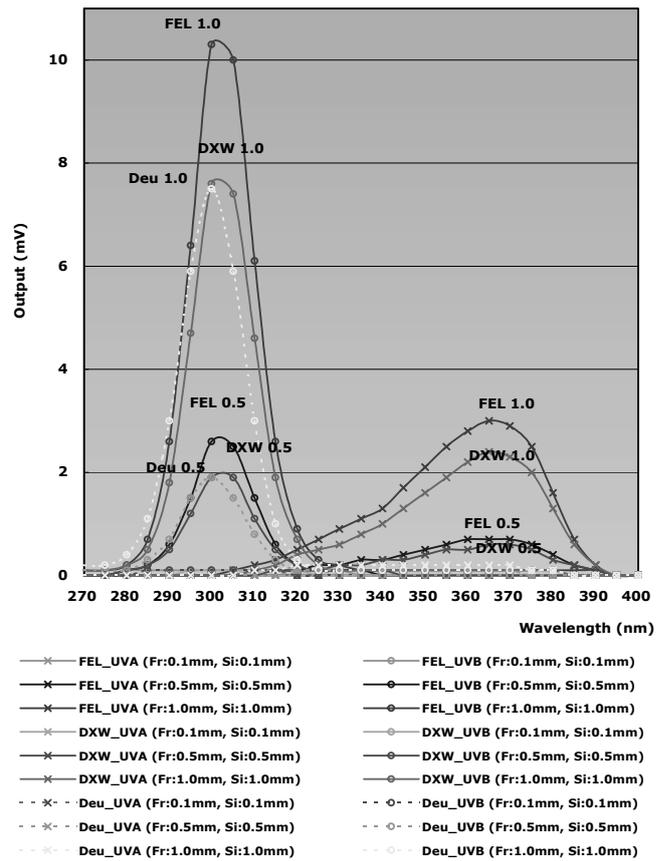


Fig. 7 Outputs (mV) of UVSABT 030-620 in lamp test. Light source: DXW and FEL NIST lamps and a 30W deuterium lamp ('Deu'). Slit width: 1mm. Slit height: open (15mm). Grating: GR600.

図の通り、UVB のピーク位置は波長 302.0nm となるが、スリット高が「Open」以外は、出力が非常に小さいか、ほとんど出力が認められなかった。いっぽう UVA のピーク位置は波長 367.0nm となるが、スリットの高さが「Open」以外は、検出限界程度の出力であった。

以上のように、スリット高「Open : 15mm」位置以外では、照度が非常に低くなり試験不能となる。なお、このスリット高は、照射強度を左右するが、光路がずれていない限りその他の精度に影響を及ぼすものではない。

4.5 ランプ別照射強度

広帯域紫外域日射計の感度を求めるには、紫外域の領域で照度が高く、長時間・長期的に照度の安定したランプを使用する必要がある。ここでは、従来から使用している 1000W タングステン・ハロゲンランプの NIST ランプを 2 種(両口型 DXW ランプ S-1028 と片口型 FEL ランプ F-604)、また今回新に整備した 30W 重水素ランプの計 3 種類のランプについて試験を行った。各ランプの取り付け

位置は、Fig.1 の通りである。

この試験では、検査対象測器、スリット高は 4.2 と同様で、回折格子は GR600 とし、スリット幅を 0.1, 0.5, 1.0mm の 3 種類で実施した。これらの理論分解能は、順に 0.5, 2.5, 5.0nm である。測定方法については、4.3 と同様とした。結果を Fig.7 に示す。

図の通り、スリット幅 0.1mm では、どのランプも照度不足で測定不能である。スリット幅 0.5mm では UVB のピークはどのランプも明瞭であるが、UVA のピークについては重水素ランプ(図中 Deu)の場合では測定不能であり、他のランプでもピーク位置が明瞭ではなかった。またスリット幅 1.0mm では、UVB のピークはどのランプも明瞭で、UVA のピークについては重水素ランプの場合を除き明瞭であった。重水素ランプは、紫外域の長波長側(UVA 側)で照射強度が極端に低くなるため、UVA の観測を目的とした測器への使用は不向きである。

NIST ランプの 2 種については、FEL 型が DXW 型よりも 1.2~1.4 倍の照度となり、UVB および UVA のピークともに明瞭である。原因として、両者とも照射距離は同じであるが、FEL ランプが縦長ランプ(ランプハウスの窓も縦型)で、分光器の縦長のスリットへの入射光量が高いためと考えられる。いっぽう、DXW 型は横長のランプに対しランプハウスの窓(出口)が横型の長方形であるため、分光器の縦長スリットに、充分入射できないためと考えられる。

また UVB のピーク位置の波長について、2 種の NIST ランプと重水素ランプでは、数 nm のずれが生じている。これは、NIST ランプと重水素ランプのランプスペクトルの違いと、検査対象測器の分光特性(5. で後述するように、約 302nm がピーク位置)により生じたずれである。

4.6 波長設定精度

4.2 で述べたように、同じランプを照射しても回折格子の違いで数 nm のピーク位置のずれが生じることが明らかとなった。そこで、検査装置の波長設定精度(Wavelength Position Accuracy)を把握するため、a) hg ランプを利用した照射試験、b) 分光波長 0nm 付近での照射試験に加え、c) ブリュワー分光光度計(以下 Brewer と呼ぶ)を用いた照射試験の 3 つの方法を試みた。

a) hg ランプを利用した照射試験

この試験では、hg ランプの輝線が明瞭であるという特性を活用し、そのピークの波長が正しく照射されているかを試験した。試験では Brewer 分光常数校正装置(伊藤ほか:2003)の hg ランプを重水素ランプホルダの開口部に簡

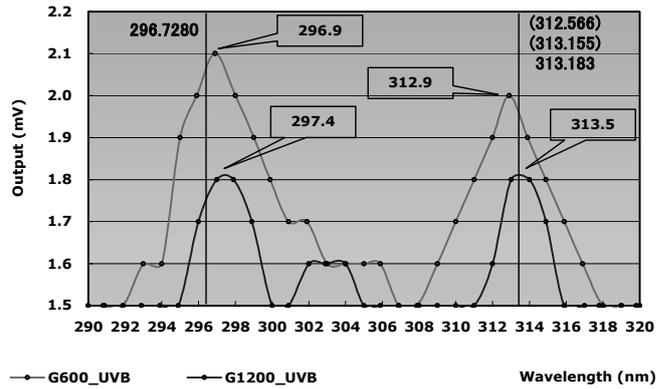


Fig. 8 Outputs (mV) of UVSABT 030-620 in wavelength position accuracy test.

Light source: hg lamp. Slit width: 1mm. Slit height: open (15mm). Grating: GR600.

易設置し、UVSABT に照射した。分光器については、回折格子 GR600 と GR 1200 の 2 種、スリット幅 1.0mm、スリット高を Open (15mm)とした。これらの理論分解能は 5.0nm (GR600)と 2.4nm (GR1200)である。UVSABT への照射は、分光波長 270.0~405.0nm の範囲で 1nm 毎とした。結果を Fig.8 に示す。

図に示されるように、hg ランプの 296.7280nm の輝線では、1nm 毎の出力の平滑化した曲線のピーク位置が GR600 の場合に約 296.9nm、GR1200 の場合に約 297.4nm となった。また 313.183nm (312.566 と 313.155nm が重なる)の輝線では、ピーク位置が GR600 の場合に約 312.9nm、GR1200 の場合に約 313.5nm となった。このように、当試験では 1nm を越すような大きな波長ずれは認められなかった。

b) 分光波長 0nm 付近での照射試験

回折格子の分光波長を 0nm に設定すると、回折格子はその位置で鏡の役目を果たす。この設定方法を利用し、波長ずれが認められるかどうかを試験した。

試験では、検査対象測器を UVSABT とし、重水素ランプを照射させ、回折格子を GR600 と GR1200、スリット幅 1mm、スリット高を Open (15mm)とした。測定は、分光波長 -5.0~+5.0nm の波長範囲(マイナス側:回折角>入射角の場合)で 1.0nm 毎とし、各回折格子に対し 4 回行った。結果を Fig.9 に示す。

図に認められる通り、GR1200 の場合、波長 0nm から ±1nm の範囲で波長ずれが認められた。これに対し GR600 の場合、低い照度で顕著なピークではないが、ほぼ 0nm で最大となり、波長ずれは認められなかった。

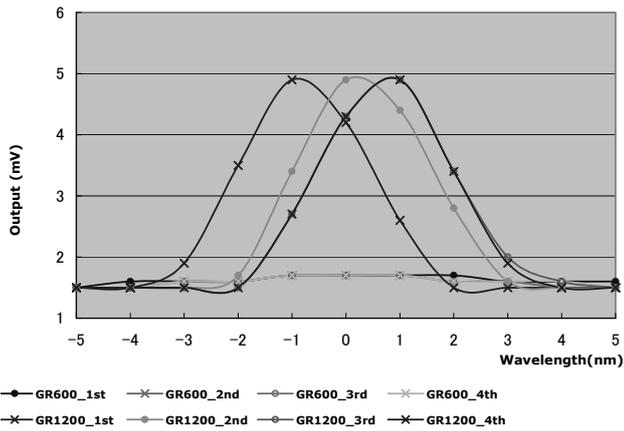


Fig. 9 Outputs (mV) of UVSABT 030-620 in wavelength position accuracy test around zero wavelength (0 ± 5 nm). Slit width: 1mm. Slit height: open (15mm). Grating: GR600. Light source: NIST DXW lamp.

c) ブリューワー分光光度計(Brewer)を用いた照射試験

この試験で使用した Brewer は MKII 型(単分光方式)の BR#034(測器番号)で、波長分解能が 0.6nm、波長設定確度は全走査領域(286.5~325.0nm)において 0.1nm 以内である。

試験では、光源を NIST ランプの DXW 型 S-1017 と重水素ランプの 2 種とし、回折格子を GR600 と GR1200 の 2 種、スリット幅を 0.1 と 1.0mm の 2 種、スリット高を Open (15mm)とした。これらの理論分解能は、GR600 の場合で 0.5nm と 5.0nm、GR1200 の場合で 0.2nm と 2.4nm である。

測定方法は、照射する分光波長を 285.0~325.0nm の範囲で 5nm 毎とし、Brewer の走査は cl.rtn(波長幅 0.1nm で走査するコマンド)を使用し、それぞれ分光された光に対し 286.5~325.0nm の範囲で 0.1nm 毎に測定した。

これらの結果の中で、NIST ランプ照射による結果を Fig.10 に示す。図中図(a)が GR600 使用でスリット幅が 0.1mm の場合、図(b)が GR600 使用でスリット幅が 1.0mm の場合、図(c)が GR1200 使用でスリット幅が 0.1mm の場合、図(d)が GR1200 使用でスリット幅が 1.0mm の場合である。

各図から、GR600 の 2 種(スリット幅 0.1 と 1.0mm)では、試験した波長帯において、Brewer で測定された各波長のピーク位置に波長ずれは認められなかった。しかし GR1200 使用の 2 種(スリット幅 0.1 と 1.0mm)では、試験した波長帯全域において約 +2nm の波長ずれが認められた。

また当図では省略したが、重水素ランプを照射した場合も NIST ランプ照射の場合と同様、波長ずれは GR600 の場合は認められなかったが、GR1200 の場合に約 +0.5nm(スリット幅 0.1mm)と約 +2nm(スリット幅 1.0mm)

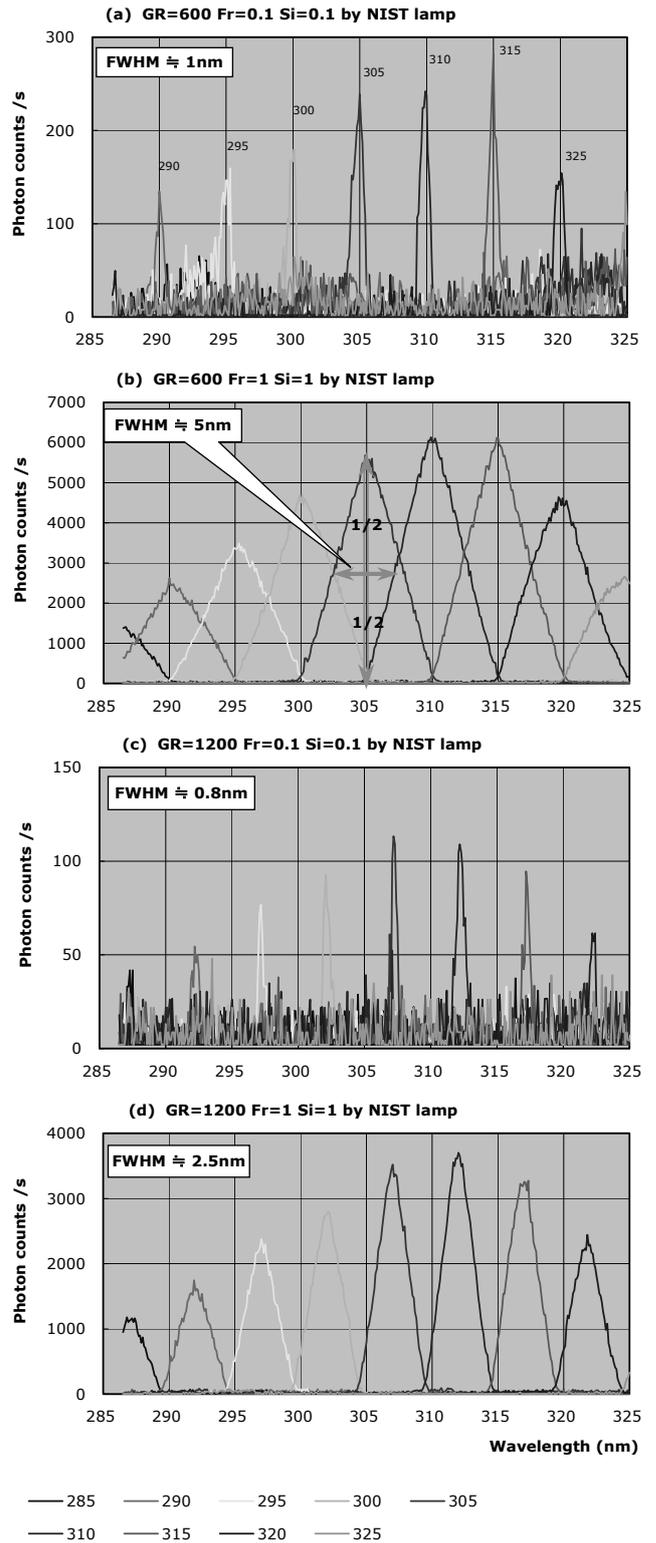


Fig. 10 Photon counts by Brewer MKII spectrophotometer BR #034 in wavelength position accuracy test at wavelength from 285 to 325nm.

(a) GR600 and slit width at 0.1mm, (b) GR600 and slit width at 1.0mm, (c) GR1200 and slit width at 0.1mm, and (d) GR1200 and slit width at 1.0mm. (a) to (d) Slit height: open (15mm). Light source: NIST DXW lamp.

の波長ずれが認められた。

このように a)の試験を除き、GR600 に波長ずれは認められなかったものの、GR1200 の場合に波長ずれが認められた。そのずれ幅は走査毎に異なるが、波長依存性を持つものではなく、どの波長でもずれ幅は一定であった。また 3.1 で説明した「ハード」の Initialize を実行しても、同じように波長ずれが認められた。

回折格子は、回折格子ホルダ(Grating Turret)に 3 枚取り付け可能となっているが、第 1 位置に GR600 が、第 2 位置に GR1200 が取り付けてある。回折格子の初期設定は第 1 位置の GR600 であり、GR1200 を使用する場合には回折格子ホルダを単に回転させるのではなく、分光器(Jovin Yvon)特有の回転法(紙面の都合で省略)により変更する。そのため、この回転により GR1200 の設置位置が、設置の度に若干ずれ、上記の波長ずれが起きるのではないかと考えられる。

以上の結果により、回折格子を GR1200 に変更する場合には、3.1 の波長ずれの補正「Calibrate Monochrometer」を行う必要がある。

5. 広帯域紫外域日射計の分光特性

5.1 試験の概要

広帯域紫外域日射計 UVSABT の分光特性については、Fig.7 のようにおおよその照度のピーク位置が判った。しかし、このピーク位置は、照射するランプのスペクトル特性の違いにより異なり、NIST ランプと重水素ランプとでは数 nm のずれが認められた。そこで、特性検査装置から照射される光の照度をエネルギー値として決定し、広帯域紫外域日射計の分光感度(Spectral Responsivity)の算出を試みた。

試験では、光源を NIST ランプとし、当装置から照射される光を Brewer MKIII(二重分光方式) BR#174 と UVSABT 030-620 に、同じ条件下で照射した。Brewer MKIII は 286.5 ~ 363.0nm の波長帯で測定が可能で、0.5nm の波長毎に測器感度が設定されている。この Brewer を UVSABT の測定位置と一致するように設置して測定すれば、当装置から照射される光の波長別照度が得られ、UVSABT の分光感度を算出することができる。

5.2 試験方法

4. の試験結果から、最も明るい照度の FEL 型 NIST ランプ(F-604)を使用し、照射照度が充分得られる設定条件(スリット高 Open (15mm), スリット幅 1.0mm)で回折格子 GR600 により試験した。特性検査装置から照射する光については波長 285~370nm で 1nm 毎とし、Brewer の ux.rtn

(286.5~363.0nm を 0.5nm 毎に走査)を使用して測定した。このときの理論分解能は、5.0nm である。

また照射照度が若干低くはなるが、スリット幅を 0.5mm に変更した試験を追加した。この追加試験では、波長 285 ~ 370nm で 5nm 毎とし、同じ Brewer の ux.rtn を使用して測定した。このときの理論分解能は、2.5nm である。

測器への照射距離については、3.2 の通り Brewer と UVSABT 双方とも 95mm とした。また Brewer の測定値については、上記試験直後に外部標準ランプ点検を行い、感度補正を施した。

5.3 波長別感度

UVSABT の波長別感度を、以下の順序で求めた。

1) Brewer の波長別光子計数率 BC_W

Brewer で得た波長別光子計数率 BC_W (1 秒当たりの光子計数値：単位を $C = \text{photon counts/sec}$ とする)について、Fig.11(a)に「スリット幅 1.0mm の場合」を、Fig.11(b)に「スリット幅 0.5mm の場合」を示す。図には、測定された全ての光子計数率を重ね合わせた。

ここで、当装置に波長ずれがないものとし、図中の各ピークの光子計数率だけを抽出し、波長別光子計数率 C_W とした。このときの、「スリット幅 1.0mm の場合」は 287.0 ~ 363.0nm の範囲で 1nm 毎に 77 個のデータが、「スリット幅 0.5mm の場合」は 290.0~360.0nm の範囲で 5nm 毎に 15 個のデータとなる。

2) 波長別照度 I_W

ここで、特性検査装置から照射された光の波長別照度を $I_W(\mu \text{ W/cm}^2 \cdot \text{nm})$ 、Brewer の波長別測器感度を $BR_W(C/\mu \text{ W/cm}^2 \cdot \text{nm})$ 、Brewer の外部標準ランプ点検による感度補正量を $\alpha\%$ とすれば、次式により波長別照度を求めることができる。

$$I_W = (BC_W / BR_W) \times 100 / (100 + \alpha) \dots\dots\dots (1)$$

以上により得られた波長別照度 I_W を Fig.11(c)に示す。中央の曲線が「スリット幅 1.0mm の場合」で、下側の曲線が「スリット幅 0.5mm の場合」である。また、参考のため、ここで試験に使用した NIST ランプ F-604 の照度(図中左上の曲線)を付け加えた。F-604 の照度は、ランプフィラメントより 500mm の距離におけるものであるが、図の通り、当装置を通過した光は「スリット幅 1.0mm の場合」で約 65%、「スリット幅 0.5mm の場合」で約 35%に低下したことが判る。

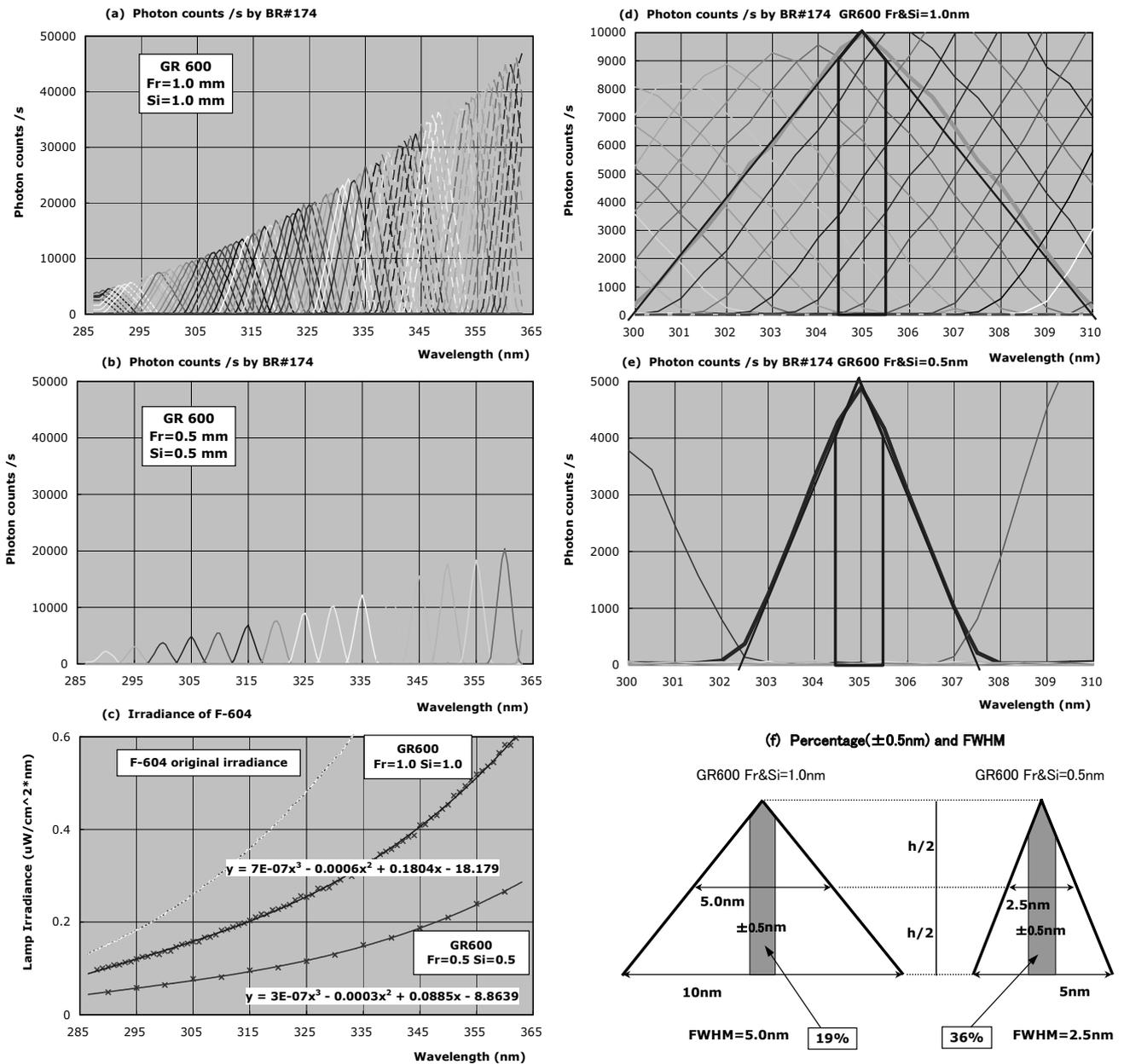


Fig. 11 Spectral sensitivity of the system by the test using Brewer MKIII spectrophotometer BR#174. (a) Photon counts with BR#174 under light at wavelengths from 286.5 to 363.0nm at 1nm intervals. Grating: GR600. Slit width: 1.0mm. (b) Photon counts with BR#174 under light at wavelengths from 286.5 to 363.0nm at 5nm intervals. Grating: GR600. Slit width: 0.5mm. (c) Irradiance of the system and original irradiance of NIST FLE F-604 lamp. (d) Enlargement of (a) from 300 to 310nm. (e) Enlargement of (b) from 300 to 310nm. (f) Percentage of the irradiance at wavelengths of $\pm 0.5\text{nm}$ and FWHM. Light sources of (a) to (e): FEL NIST lamp F-604.

次に波長 $W(\text{nm})$ を変数として、以下の波長別照度の近似式を導出した。

「スリット幅 1.0mm の場合」

$$I_W = 6.90^{-7} W^3 - 6.04^{-4} W^2 + 0.18 W - 18.18 \dots (2)$$

「スリット幅 0.5mm の場合」

$$I_W = 3.40^{-7} W^3 - 2.97^{-4} W^2 + 0.09 W - 8.86 \dots (2')$$

3) 実質波長分解能 FWHM と照射占有率 β

当装置から照射される光の波長別照度 $I_W (\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$ を(2)式と(2')式で求めることができるので、同じ光を UVSABT に照射したときの出力を $UO_{WNC}(\text{mV})$ とすれば、UVSABT の波長別感度 $UR_{WNC}(\text{mV}/\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$ は次式により得られる。

$$UR_{WNC} = UO_{WNC} / I_W \dots\dots\dots (3)$$

しかし、分光された特定波長の光を UVSABT に照射させた時、UVSABT は 1nm 分のエネルギーだけではなくその周辺光のエネルギーも含めて出力する。そこで、特性検査装置の実質波長分解能(Typical Spectral Resolution of FWHM: 以下単に FWHM と呼ぶ)により、周辺光がどこまで含まれているかを調べ、特定波長 1nm 分の照射量を求める必要がある。Fig.11(d)に Fig.11(a)の 305nm 付近の拡大図を、Fig.11(e)に Fig.11(b)の同じ 305nm 付近の拡大図を示す。図のように、FWHM はピーク波長の 1/2 のところの波長幅として算出されるので、

実質波長分解能(Typical Spectral Resolution of FWHM)

- 「スリット幅 1.0mm の場合」……… 5.0 nm
- 「スリット幅 0.5mm の場合」……… 2.5 nm

となる。この値は、Table 3 で示した理論分解能(Theoretical Spectral Resolution)を裏付けるものである。

また、この FWHM は、波長 286.5~363.0nm の測定範囲のどこでも同じである。そこで Fig.11(d)と Fig.11(e)に示される曲線を Fig.11(f)のように簡易的に 2 等辺三角形と考え、全照射量(積分値)のなかで、中央の±0.5nm 分の照射量(1nm 分の積分値)が占める照射占有率βを求めた。結果は次の通り。

全照射量に対する特定波長±0.5nm 分の照射占有率β

- 「スリット幅 1.0mm の場合」……… 0.19
- 「スリット幅 0.5mm の場合」……… 0.36

4) UVSABT の波長別感度 UR_{WC}

3)で求めた照射占有率βにより、波長別出力値 UO_{WC}は、UVSABT の出力値 UO_{WNC} から

$$UO_{WC} = UO_{WNC} \times \beta \dots\dots\dots (4)$$

により算出できるので、UVSABT の波長別感度 UR_{WC}(mV/μW/cm²・nm)は、

$$UR_{WC} = (UO_{WNC} \times \beta) / I_W \dots\dots\dots (5)$$

により求められる。Fig.12(a)に(3)式による補正なしの波長別感度 UR_{WNC}を、Fig.12(b)に(5)式による補正後の波長別感度 UR_{WC}を示す。

図の通り、UVB と UVA のピーク値については、補正後

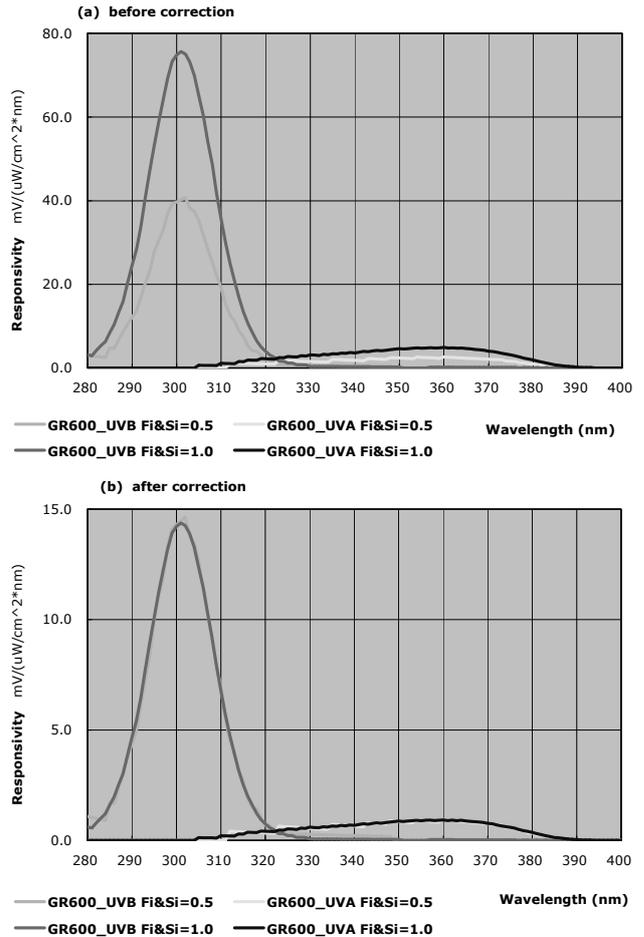


Fig. 12 Responsivities of broad band UV radiometer UVSABT 030-620 determined by the spectral sensitivity calibration system. (a) Before correction. (b) After correction.

の値は補正前の値に比べ「スリット幅 1.0mm の場合」で 19%、「スリット幅 0.5mm の場合」で 36%となったが、補正後においてそれら両者の値はほぼ一致した。この結果から、当補正を行えば、スリット幅に関係なく UVSABT の分光感度が得られることを確認した。また、2.5 で記述したように、一般に回折格子の刻線数が多いほど、またスリット幅が狭いほど、波長分解能は高くなる。しかし、特性検査装置から照射される光の照射量は、波長分解能が高くなるほど少なくなり、測定が不能となる。したがって、この特性検査装置では GR600 による「スリット幅 0.5mm の場合」による試験が測定限界で、それ以下のスリット幅では測定できない。この 0.5mm の幅でも、Fig.12(b)に現れるように感度の低いところではスムーズな曲線は得られていない。また、回折格子を GR1200 にすると、「スリット幅 1.0mm の場合」が限界となる。このよ

うなことから、分光特性試験では、回折格子を GR600、スリット幅 1.0mm で実施しても精度的に変わらないと考えられる。

なお、当試験において UVSABT の分光感度のピーク波長は以下の通りとなり、同じ FEL 型 NIST ランプによる出力値のピーク波長(UVB : 302.0nm, UVA : 366.0nm)より短波長側にシフトした。また UVB の場合は中央にピークを持つ山型の分光感度を、UVA の場合は長波長側にピークが少しシフトした山型の分光感度を持つ。

UVB の感度ピーク波長 : 301.0 nm

UVA の感度ピーク波長 : 359.0 nm

5.4 感度 UR_{TC}

5.3 の 4)の(4)式で 1nm 毎の出力値が得られたので、これらを積算し、UVB と UVA の積算出力 UO_{TC} を求めた。いっぽう、Brewer による測定結果から得られた(2)式と(2')式による波長別照度 $I_W(\mu W/cm^2 \cdot nm)$ を積算し、UVB と UVA の積算照度 $I_T(\mu W/cm^2)$ を求めた。これらより、UVSABT の感度 $UR_{TC}(mV/\mu W/cm^2)$ は次式の通りとなる。

$$UR_{TC} = UO_{TC} / I_T \cdots \cdots \cdots (6)$$

その結果、UVSABT の感度 UR_{TC} は、

GR600 使用で「スリット幅 1.0mm の場合」

UVB : $UR_{TC} = 8.67$ (7.98) $mV/\mu W/cm^2$

UVA : $UR_{TC} = 0.45$ (0.44) $mV/\mu W/cm^2$

GR600 使用で「スリット幅 0.5mm の場合」

UVB : $UR_{TC} = 8.73$ (7.88) $mV/\mu W/cm^2$

UVA : $UR_{TC} = 0.43$ (0.42) $mV/\mu W/cm^2$

となった。なお、UVSABT は、若干ではあるが UVB や UVA の領域以外の紫外域日射を合わせて出力しているので、()内にそれぞれの波長域を限定した場合(UVB の場合は 280.0~315.0nm のみの出力の合計値、UVA の場合は 315.0nm~400.0nm のみの出力の合計値)の感度を示した。

いっぽう、NIST ランプ検定による UVSABT 030-620 の測器感度 Res は、以下の通りである。

NIST ランプ検定による感度(S-1079 ランプ 2007.06.29)

UVB : $Res = 8.51$ $mV/\mu W/cm^2$

UVA : $Res = 0.38$ $mV/\mu W/cm^2$

したがって、UVSABT の測器感度が半年間変化していな

いと仮定すると、「当試験結果による感度」は「NIST ランプ検定による感度」に比べて、UVB で約 2%とほぼ一致し、UVA で約 15%の差が認められた。

6. まとめ

本稿では、広帯域紫外域日射計用の分光特性検査装置を開発し、精度に関する各種試験を行うとともに、広帯域紫外域日射計 UVSABT(UVB と UVA を測定)の分光特性の把握を試みた。

(1) 分光特性検査装置の概要は以下の通りである。

- ・装置は、NIST ランプ装置、重水素ランプ装置、前置光学系、分光器、後置光学系で構成され、分光器の回折格子を回転させることにより、分光させた光を検査対象測器に照射させる。
- ・ランプ光源は、DXW 型 NIST ランプ、FEL 型 NIST ランプ、重水素ランプの 3 種から選択する。
- ・回折格子は、紫外域日射用の GR600 と GR1200 の 2 種で、前者は波長 150~3000nm、後者は波長 150~1500nm の範囲を最小送りステップ 0.002nm で制御 PC により走査することができる。これらの波長分解能は最小で 0.06nm である。
- ・検査対象測器は、後置光学系下端より 95mm の位置に設置する。測定では、制御 PC により目的の分光波長を選び、出力を測定する。
- ・波長ずれの補正も可能である。

(2) 各種試験結果の概要は以下の通りである。

- ・回折格子(GR600 と GR1200)については、GR1200 を使用した場合、GR600 の場合に対し、UVB の最大出力が約 1/3、UVA の最大出力も約 1/4 に減少する。
- ・スリット幅(0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0mm)については、GR600 使用の場合、UVB 出力は 0.5~2.0mm、UVA 出力は 1.0~2.0mm の範囲のスリット幅で出力可能となることを確認した。
- ・スリット高(Open, 1mm, Close)については、Open (15 mm) 位置でのみで使用が可能である。
- ・ランプの種類(DXW 型 NIST ランプ、FEL 型 NIST ランプ、重水素ランプ)については、FEL 型ランプが最も照度が高く、重水素ランプでは UVA 領域で出力が得られなかった。
- ・測定波長精度については、GR1200 の場合に波長ずれが最大で 2nm 認められ、そのずれ幅は走査毎に異なる。そのため、GR1200 使用の場合、波長ずれ補正が必要である。

(3) 広帯域紫外域日射計 UVSABT の分光特性

当装置から照射される光を Brewer による測定値から、UVB と UVA の波長領域における幅±0.5nm 毎の照度に変換し、UVSABT の分光感度を求めた。その結果、UVB 出力の感度のピークは 301.0nm、UVA 出力の感度のピークは 359.0nm となり、前者は中央にピークを持つ山型の分光感度を、後者は長波長側でやや落ち込みが急な山型の分光感度を持つことが明らかとなった。

また、UVSABT の波長 1nm 毎の出力値を補正し、UVB と UVA の波長領域の積算出力値を算出し感度を求めたところ、8.73(UVB)と 0.43 (UVA) mV/ μ W/cm²となり、NIST ランプ検定による測器感度に比べ、前者ではほぼ一致し、後者では約 15%の差が生じた。

以上のように、今回製作した広帯域紫外域日射計用分光特性検査装置は、分解能 2nm 以下、走査波長 1nm 以下という WMO(2004)の走査基準を満たすことを確認した。なお、この走査では被検査器に照射する分光光の照度が低くなり、被検査器の出力は小さくなるが、本稿で提案する方法で波長別感度を校正すると、分解能を 5nm とした場合でも、分解能を 2.5nm とした場合と同等に感度を校正することができた。

今後は、照射光量不足対策としてキセノンランプ等、他のランプを使用した試験を行うとともに、長期的に安定したより強い照度の光路を考え、様々な検査対象測器にも対応できるよう改良していきたい。

謝 辞

本稿を草するに際し、高層気象台の松原廣司台長、観測第三課の廣瀬保雄課長には数々のご助言を賜り、本庁オゾン層情報センターの江崎雄治係長には機器類の調達等でご面倒をおかけした。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- Horiba Jobin Yvon (1996): LSH Series lamp housings user manual, Part Number 81007 Rev A. *Horiba Jobin Yvon Inc.*, 21pp.
- Horiba Jobin Yvon (2007a): iHR fully automated imaging spectrometer user manual, Part Number 81092 Rev 2. *Horiba Jobin Yvon Inc.*, 72pp.
- Horiba Jobin Yvon (2007b): iHR 320 system test report (S/O#: 37051). *Horiba Jobin Yvon Inc.*, 11pp.
- 伊藤真人・宮川幸治(2001): 二重分光光度計 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(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(2004): 回折格子を利用した新型紫外域分光光度計の試験結果. 高層気象台彙報, **64**, 49 - 54.
- 伊藤真人・高野松美(2006): 広帯域(全天型)紫外域日射計用外部標準ランプ点検装置の開発とその精度. 高層気象台彙報, **66**, 57 - 64.
- Kipp & Zonen (1999): Brewer MKIII spectrophotometer operator's manual, OM-BA-C231 Rev. B. *Kipp & Zonen Inc., Canada*, 135pp.
- 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.
- WMO (1998): Guidelines for site quality control of UV monitoring. *WMO/GAW*, No.126, 39pp.
- WMO (2004): Instruments to measure solar ultraviolet radiation, Part 2: Broadband instruments measuring erythemally weighted solar irradiance. *WMO/GAW*, No.164, 51pp.