

ドブソン分光光度計の光学くさびの透過特性点検方法の開発

江崎 雄治*・押木 徳明*

Test Method of Transmission Characteristics for the Optical Wedge of Dobson Spectrophotometer

Yuji ESAKI and Noriaki OSHIKI

要旨

ドブソン分光光度計の光学くさびの透過特性(濃度の勾配)の変化は、2 ランプ点検(気象庁：1991)により確認している。この点検は、長時間(約3時間)を要するという問題点がある。前報(江崎・押木：2013)では、光学くさびの透過光の強さ(光電子増倍管(PMT)の出力)を直接測定し、その透過特性を点検する方法を新たに開発した。しかし、この方法には、2 ランプ点検の点検値に対して、一定の偏差が認められるという問題点があった。本稿では、PMT の暗電流出力を電氣的に遮断した透過光のみの出力測定を行い、この偏差を解消することができた。この方法による光学くさびの透過特性の点検は、2 ランプ点検とほぼ同等の点検結果を示し、点検に要する時間を約1時間に短縮することができた。

1. はじめに

ドブソン分光光度計により測定するオゾン量は、測器内部に導入した光について、指定された2つの波長の紫外光を交互に取り出し、その強度比を測定することにより求めている(気象庁：1991)。光学くさびは、この強度比を求めるために用いられるが、汚れ等によりその透過特性が変化した場合、観測精度に直接影響を及ぼすこととなる。この変化の監視には、2 ランプ点検(以下、「従来法」という)が用いられる。従来法では、3つの波長組を点検するが、1波長組あたり約3時間の点検時間を要する。このため、点検時間の短縮が求められている。

前報(江崎・押木：2013)では、新たな光学くさびの透過特性の点検方法として、光学くさびを透過した光の強度を複数の透過位置で直接測定する方法(以下、「直接法」という)を報告した。この方法による点検値には、従来法の点検結果に対する一定の偏差及び測定誤差が存在した。測定誤差については、検出器の光電子増倍管(以下、「PMT」という)の出力値を目視測定していたことがひとつの原因である。

本稿では、直接法を目視測定による誤差を低減した上で、直接法と従来法との点検結果に偏差が発生した原因を解析し、この結果を基に直接法を改善する。具体的に

は、PMT の出力を目視測定からデジタル値取得に変更することにより、直接法における測定誤差を取り除いた。また、従来法に対して認められる直接法の偏差の原因を調査するために、2つの波長の紫外光のPMT出力をそれぞれ独立して測定可能なアナログアンプを新たに製作し、さらに、直接法による点検結果が、異なる測器の光学くさびに対して、従来法と同等の結果を示すかを確認した。これらの結果を報告する。

2. 従来法と直接法

直接法による点検結果は、従来法による光学くさびの透過特性の点検結果を基準として評価する。従来法と直接法との具体的な違いを以下に述べる。

(1) 従来法

測器毎に付けられたR-N表(測器上面に取り付けた測定ダイヤル(Rダイヤル)の値と光学くさびの濃度の関係を示したもの(気象庁：1991))において、あるRダイヤル値(R1)のN値(N1)と、ランプ光量が2倍(光学くさびの濃度が2倍)となるRダイヤル値(R2)でのN値(N2)との関係(N2-N1)は、 $30.1(=100 \times \log 2)$ となる。光学くさびに汚れがあれば、点検結果として、この基準値(30.1)に偏差が現れる。従来法では、この偏差量を点検する。

(2) 直接法

*高層気象台 観測第三課

従来法から作成された R-N 表に基づき、光学くさびの濃度が 2 倍となる R ダイアル位置を求め、4. で述べる光学くさびの減衰比を計算して点検する。

3. 光学くさびの仕様

直接法による透過特性の点検には、以下に述べる仕様の光学くさびを使用した。

光学くさびは、クロメル(ニッケル 90%とクロム 10%の合金)が濃度傾斜を持たせて蒸着された、2 枚の水晶板で構成されている。光学くさびの濃度は、R ダイアルを 0° から 300° の範囲で回転させて制御する。R ダイアルを 0° に設定すると、光学くさびの濃度が最も薄くなる(ほとんど減衰せずに測定光は通過する)。R ダイアルを 300° に設定すると、光学くさびの濃度が最も濃くなる(ほぼ完全に測定光は吸収される)。光学くさびの濃度は、R ダイアルを約 30° 回転させるごとに 2 倍となる。

4. 直接法による測定

直接法による光学くさびの透過光の測定には、自動化(宮川・能登：1991, 高層気象台観測第三課：1996)されたドブソン分光光度計を用いた。R ダイアル及び Q レバーの角度、PMT に加える電圧の制御及び PMT 出力のデジタル値の取得は、ドブソン分光光度計自動制御プログラム(宮川：2002)のメンテナンスモードにより行った。測定に使用した主要機器の一覧を表 1 に示す。

(1) 使用測器

129 号機：予備器(以下、「D129」という)

128 号機：移動準器(以下、「D128」という)

(2) 測定条件

光源：250W ハロゲンランプ(ウシオ電機(株))

光源の電圧：DC 24.0V

光源を標準ランプ点検用のランプホルダに取り付け、点灯した光源の光を測器内部に導入した。

波長組選択用操作棒の位置：LONG

測定対象：S3 スリット(光学くさび)の透過光

測定波長：2 ランプ点検と同様の A, C 及び D 波長組の内の長波長側の紫外光(表 2)を測定する。

(3) 測定方法

目視測定：光学くさびの透過光出力をガルバノメーターで読み取り、記録する。

デジタル PMT 出力：1 秒間隔の透過光の PMT の出力データ(電圧値)を約 45 秒間取得し、後半 30 秒間のデジタル値 30 個を平均した値である。

PMT 暗電流：光路を遮蔽した S2 スリット側の PMT の信号を示す。

表 1 測定に使用した主要機器の一覧

品名	型番(製造者)
PMT	R212 (浜松ホトニクス)
ガルバノメーター	MODEL 2708 (YOKOGAWA)
アナログアンプ	SAMP01改修品(アルファ電子)
A/Dボード	CPZ-3135 (インターフェース)

表 2 光学くさび透過特性の測定波長
下線を引いた数値が測定に用いた波長。

波長組	波長(nm)
A	305.5 , <u>325.4</u>
C	311.45 , <u>332.4</u>
D	317.6 , <u>339.8</u>

PMT に加える電圧：アッテネーター(以下、「ATT」という)値を適宜変化して調整する。

(4) 光学くさびの状態

D129：高濃度側に汚れが存在

D128：ほぼ汚れが無い状態

直接法による光学くさびの透過特性(濃度の勾配)は、以下の計算方法を用いて求めた。

ある R ダイアル値(R_n)での透過光のデジタル PMT 出力(E_n)と、R-N 表から求めた 2 倍の光学くさび濃度となる R ダイアル値(R_{n+30})での透過光のデジタル PMT 出力(E_{n+30})との比(E_{n+30}/E_n)の対数値($\log(E_{n+30}/E_n)$)を計算し、これを光学くさびの減衰比とする。PMT の出力が光の強度に対して線形に変化する場合、その減衰比は、光学くさびの特性が変わらない限り、 $-0.301(\log 1/2)$ となる。

本稿では、従来法と直接法との点検結果の比較を容易にするため、直接法により求めた光学くさびの減衰比を 100 倍し、この値から理想的な光学くさびの減衰比 $-30.1(100 \cdot \log(1/2))$ を差し引いた値(以下、「減衰特性」という)を算出して用いた。

E_n 及び E_{n+30} は、 R_n を 10° 間隔で $0 \sim 270^\circ$ まで変化させて測定した。また、これまでの調査結果を基に、 R_n におけるガルバノメーターの指示値が約 $17\mu A$ となるように ATT 値を設定した。

なお、本稿の図中に測器の略号を記していない場合は、すべて D129 の測定結果を示す。

5. 結果と考察

5.1 PMT の出力特性

直接法と従来法との点検結果の偏差原因を解析するにあたり、ドブソン分光光度計の検出器である PMT の出力がどのような特性を持つかを調査した。4. の方法による光学くさびの透過光のデジタル PMT 出力(E_n 及び E_{n+30})の

表3 光学くさびの透過光のデジタル PMT 出力(E_n 及び E_{n+30})の測定結果

	出力値	標準偏差	変動係数
E_n	約-0.09V	約0.0096	約11%
E_{n+30}	約-0.045V	約0.0048	約11%

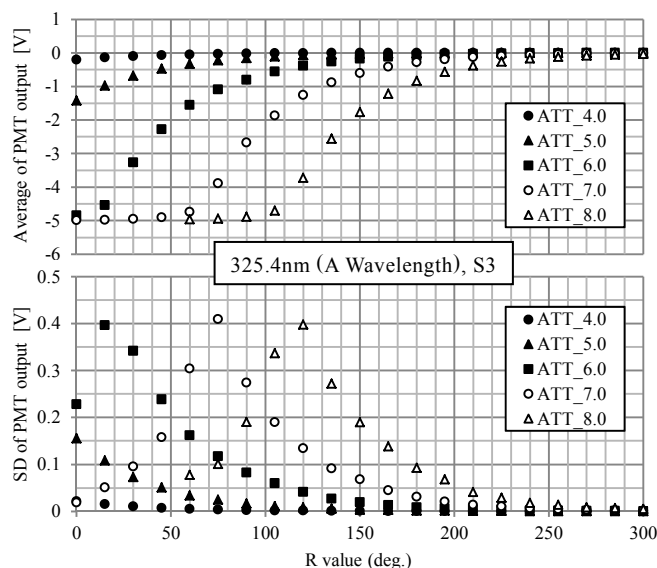


図1 A波長組におけるRダイヤル値と光学くさびの透過光強度(デジタル PMT 出力)との関係

(上図) 透過光強度, (下図) 透過光強度の標準偏差.

凡例で ATT に続く数字は PMT の ATT 値を示している.

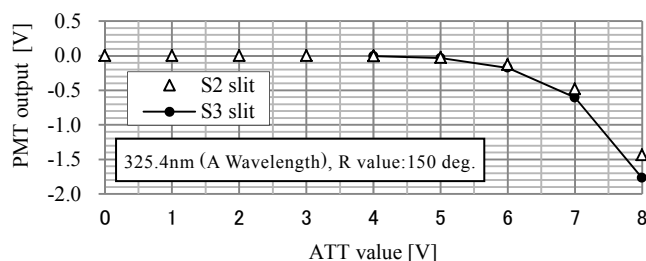


図2 PMT の ATT 値と光学くさびの透過光強度 (デジタル PMT 出力)及び PMT 暗電流との関係

測定は A 波長組(325.4nm), R ダイヤル値: 150° で実施.

測定結果を表3に示す.

直接法による光学くさびの透過光のデジタル PMT 出力の範囲は, A, C, D 各波長組ともに約-0.09V~約-0.045Vで, 違いはなかった. デジタル PMT 出力の変動係数の結果に注目すると, その値はともに約 11%を示した. この変動係数は, 波長組が変わっても, ほぼ同様の値(約 11%)を示した. この結果, 直接法における PMT の出力は, ばらつきが大きい特性を持つことがわかった.

次に, 紫外光が光学くさびを透過する位置(R ダイヤル値)が変わると, デジタル PMT 出力がどのように変化する

かを, PMT の ATT 値ごとに調べた. 図1に, A 波長組(325.4nm)における R ダイヤル値と光学くさびの透過光強度(デジタル PMT 出力)との関係を示す. なお, 同様の傾向を示す C 波長組(332.4nm)及び D 波長組(339.8nm)については, 図を省略した.

光学くさびの透過光強度(図1(上))は, すべての ATT 値で, 光学くさびの濃度が薄く(R ダイヤル値が小さく)なるにつれて増加する. その増加率は, ある濃度を超えると急激に増える傾向が認められた. この濃度は, ATT 値ごとに異なった. さらに, PMT の出力は, ATT 値が 6.0~8.0 の場合に, -5V の値で頭打ちとなった. これは, A/D ボードの出力仕様が±5Vであることによる. 光学くさびの透過光強度の標準偏差(図1(下))は, 光学くさびの濃度が薄く(R ダイヤル値が小さく)なる程大きくなる. その値は, ATT 値が 6.0~8.0 の場合に, ATT 値ごとに異なる濃度を頂点として減少していく傾向が認められた. これは, 上に示した A/D ボードの出力下限値に近づくにつれて, その出力変化幅が小さくなっていったことによると考えられる.

光学くさびの透過光のデジタル PMT 出力に及ぼす PMT 暗電流の影響は, よく知られていない. 今回, 新たに製作したアナログアンプを用いて, デジタル PMT 出力と PMT 暗電流の出力を独立して測定し, その関係を調査した. 図2に A 波長組, R ダイヤル値: 150°(光学くさび中間濃度)における, PMT の ATT 値と光学くさびの透過光強度(デジタル PMT 出力)及び PMT 暗電流との関係を示す. なお, 同様の傾向を示す C 及び D 波長組については, 図を省略した.

光学くさびの透過光及び PMT 暗電流の出力(図2)は, ATT 値が 5 を超えると, 両者ともに急激に増加する. 直接法による光学くさびの透過光のデジタル PMT 出力は, 約-0.09V~約-0.045V の範囲にある(表3). この範囲の透過光の出力に対する PMT 暗電流の割合は, 約 80%となる. このことは, 測器内部の迷光が原因と考えられ, 光学くさびの透過光の測定において, PMT 暗電流の影響を無視できないことを示している.

5.2 目視測定とデジタル測定

直接法における目視測定とデジタル測定による点検結果を比較し, 目視測定の測定誤差が点検結果に与える影響を調べた. A 波長組における直接法と従来法による光学くさびの濃度勾配の関係を図3に示す. なお, 同様の傾向を示す C 及び D 波長組については, 図を省略した.

目視測定による光学くさびの減衰特性(▲)は, 従来法による点検結果(太実線)と比べて, 概ね同様の傾向を示すが,

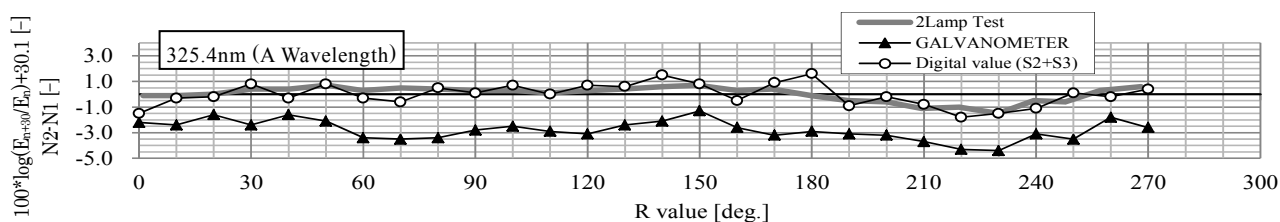


図 3 A 波長組における直接法と従来法による光学くさびの濃度勾配の関係

太実線は従来法(2014/1/23 点検), ▲は直接法(目視測定: 2013/3/9 実施), ○は直接法(デジタル測定: 2014/1/31 実施) による光学くさびの濃度勾配をそれぞれ示す。

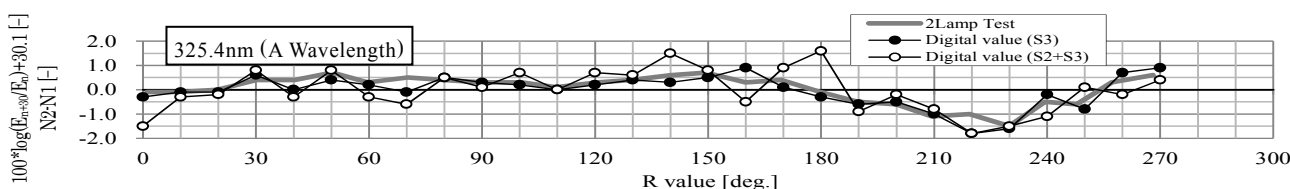


図 4 A 波長組における直接法と従来法による光学くさびの濃度勾配の関係

太実線は従来法(2014/1/23 点検), ●は直接法(透過光出力: 2014/3/3 実施), ○は直接法(透過光出力及び PMT 暗電流: 2014/1/31 実施) による光学くさびの濃度勾配をそれぞれ示す。

約 3 の負偏差が認められた(江崎・押木: 2013)。

この測定での PMT の出力信号とは, S3 スリット側の透過光の出力信号と S2 スリット側の PMT 暗電流の信号が合成されたものである。この 2 つの信号は, 切り替え周期が約 30Hz の矩形波でノイズを含んだ形状をしている。測定に使用するガルバノメーターの応答性能では, 約 30Hz 周期の早い変化に追従することは不可能である。このことが, 直接法と従来法との点検結果に一定の負の偏差(図 3)が現れた原因と考えられる。

デジタル測定による光学くさびの減衰特性(○)は, 従来法による点検結果(太実線)と比べて, その変化傾向が目視測定の結果(▲)よりも一致する。以上の結果から, デジタル測定は, 光学くさびの透過特性の点検において, 従来法による点検結果との負の偏差を解消できることが確認された。

5.3 透過光出力と PMT 暗電流

光学くさびの透過特性の点検における PMT 暗電流の影響を調べた。この調査には, 前述のアナログアンプを使用し, PMT 暗電流の信号を電氣的に遮断または接続して, その影響を測定した。A 波長組における直接法と従来法による光学くさびの濃度勾配の関係を図 4 に示す。なお, 同様の傾向を示す C 及び D 波長組については, 図を省略した。

光学くさびの透過光のみの出力(●)と透過光出力及び PMT 暗電流の合成出力(○)は, 従来法の点検結果と比べて, 概ね一致した。詳しく見ると, 後者(○)は, 前者(●)と比べて従来法(太実線)に対する偏差が大きくなった。また,

それぞれの偏差量は, 一定ではなく, R ダイアル値軸方向にランダムなばらつきを示している。両者の違いは, 5.1 で示した光学くさびの透過光の出力に対する PMT 暗電流の影響を反映していると考えられる。この結果から, 直接法による光学くさびの透過特性の点検では, 点検精度を向上させるために, PMT 暗電流の信号を電氣的に遮断する必要があることがわかった。

5.4 D129 の点検結果

直接法による光学くさびの点検結果の再現性を調べた。D129 の光学くさびの透過特性の点検を複数回行うことにより, その再現性を確認した。A, C 及び D 波長組における直接法と従来法による光学くさびの濃度勾配の関係を図 5 に示す。

従来法の点検結果の合格判定基準が, ± 0.3 以下であることや図 5 のそれぞれのエラーバー(標準偏差)の幅を考慮すると, 直接法による点検結果(●)は, 従来法による結果(太実線)と, 3 つの波長組で良い傾向の一致が認められた。個々の点検結果に着目すると, 光学くさびの減衰特性の標準偏差には, R ダイアル値軸方向にランダムに現れる違いが認められる。これは, 光学くさびの減衰特性(2 つのデジタル PMT 出力の比)を求める過程で, それぞれのデジタル PMT 出力が持つ誤差が増大または縮小されたことが原因と考えられる。

5.5 D128 の点検結果

直接法の点検により, D129(予備器)の光学くさびの濃度勾配の状態を表現することができた。このことが, 他の

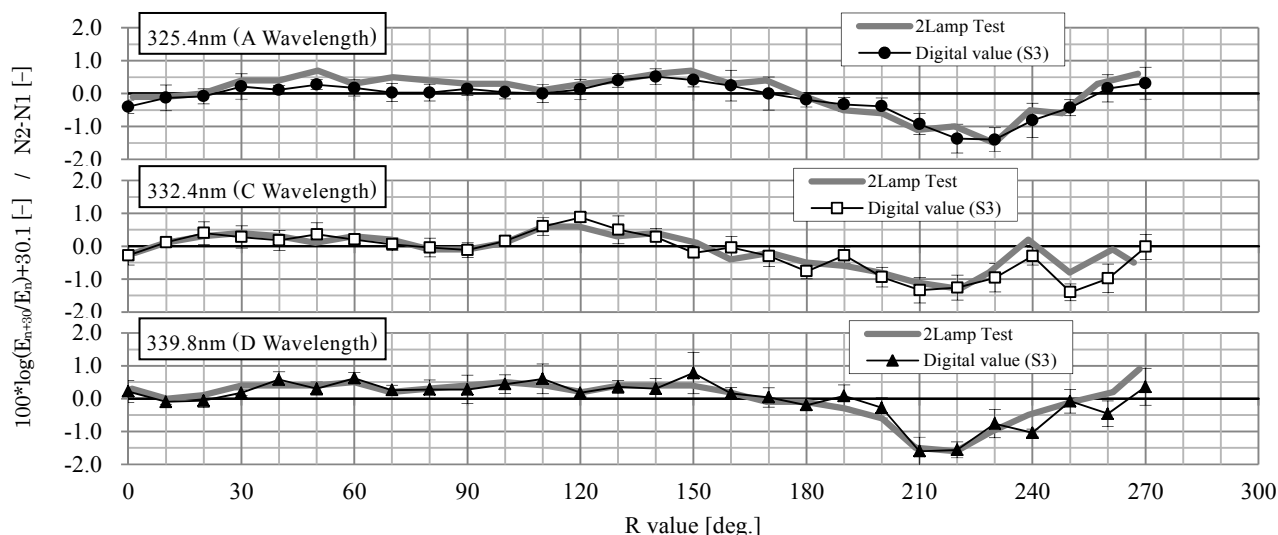


図 5 各波長組における直接法と従来法による光学くさびの濃度勾配の関係

(上図) A 波長組, 太実線は従来法(2014/1/23 点検), ●は直接法(透過光出力のみ)の 7 回の平均,
 (中図) C 波長組, 太実線は従来法(2014/1/24 点検), □は直接法(透過光出力のみ)の 5 回の平均,
 (下図) D 波長組, 太実線は従来法(2014/1/22 点検), ▲は直接法(透過光出力のみ)の 5 回の平均を示す。
 エラーバーは各波長組における透過光出力の減衰特性の標準偏差を示す。

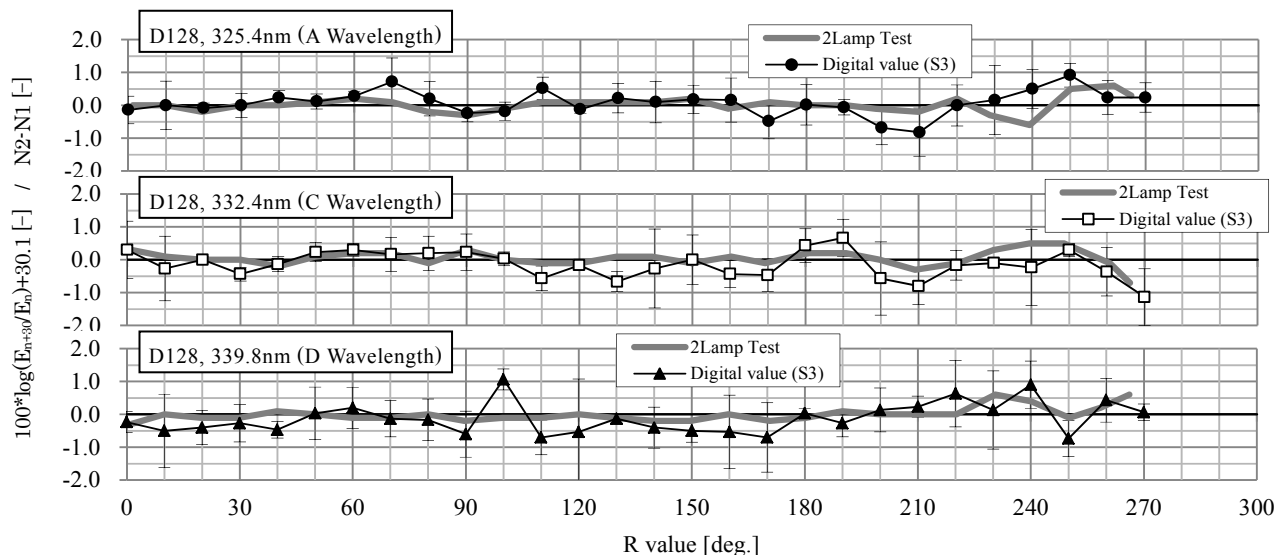


図 6 D128 の各波長組における直接法と従来法による光学くさびの濃度勾配の関係

(上図) A 波長組, 太実線は従来法(2014/1/28 点検), ●は直接法(透過光出力のみ)の 5 回の平均,
 (中図) C 波長組, 太実線は従来法(2014/2/13 点検), □は直接法(透過光出力のみ)の 3 回の平均,
 (下図) D 波長組, 太実線は従来法(2014/1/31 点検), ▲は直接法(透過光出力のみ)の 3 回の平均を示す。
 エラーバーは各波長組における透過光出力の減衰特性の標準偏差を示す。

測器の光学くさびについても当てはまるかを確認するために, D128(移動準器)を用いて調査した。D128 の A, C 及び D 波長組における直接法と従来法による光学くさびの濃度勾配の関係を図 6 に示す。

D129(図 5)と D128 (図 6) の点検結果を比較すると, D128 の点検結果は, 全体的に従来法の結果(太実線)に対する偏差量が大きく, 光学くさびの濃度勾配の状態を良

く表現できていない。また, それぞれのエラーバー(標準偏差)の幅も D129(図 5)の結果と比較して大きい。

次に, この違いが現れた原因を考察する。D129 及び D128 について, A, C 及び D 波長組における光学くさびの減衰特性の標準偏差の平均を表 4 に示す。

D128 の標準偏差は, D129 に対して, 最大で 2 倍以上大きい値を示した(表 4)。このことが, D128 の光学くさびの

表 4 各波長組における減衰特性の標準偏差の平均
標準偏差の数値に続く括弧内の数字は、測定回数を示す
R ダイアル値 0~270° の区間で平均した。

波長組	標準偏差の平均	
	D129	D128
A	0.30 (7)	0.46 (5)
C	0.29 (5)	0.52 (3)
D	0.28 (5)	0.63 (3)

透過特性の点検結果を悪くした原因と考えられる。また、この結果は、D129 に比べて D128 の PMT の出力安定性が劣ることを示している可能性がある。この違いは、単なる PMT の個体差か、もしくは、D128 の PMT を交換すべき時期にあることを示している可能性がある。これまでの D128 の標準ランプ点検等の結果からは、PMT の劣化の兆候は見出せないため、今後、PMT の安定度調査を実施して総合的な判断を行いたい。

5.6 D129 の点検結果から作成した R-N 表

従来法を直接法に置き換えるには、直接法の点検結果から従来法と同様の R-N 表を作成できることが必要である。そこで、直接法による D129 の光学くさびの透過特性の点検結果から R-N 表の作成を試みた。測定条件は、R ダイアル値の変化幅と減衰比を計算する角度幅を 10.0° に設定した以外は、4. と同じである。図には示さないが、直接法の点検結果から作成した R-N 表は、R ダイアル値軸方向にランダムに現れる光学くさびの減衰特性の誤差(ばらつき)が影響して、有効なものとはならなかった。この減衰特性の誤差の低減が今後の課題となった。

6. まとめ

ドブソン分光光度計の光学くさびの透過特性を点検する方法として、光学くさびを透過した光の強度を複数の透過位置で直接測定する方法(直接法)を開発した。本方法と従来行われてきた 2 ランプ点検(従来法)による点検結果との偏差(江崎・押木：2013)は、測器の検出器である光電子増倍管(PMT)の暗電流出力を電氣的に遮断し、透過光の出力のみを測定することにより解消されることがわかった。この改善した方法は、D129(予備器)の光学くさびの透過特性(高濃度側に汚れが存在)を、2 ランプ点検の点検結果とほぼ同様に表現できた。D128(移動準器)の光学くさびの透過特性については、PMT の安定性が原因で、PMT 出力の測定結果にばらつきが生じたと考えられる。このことから、従来法による点検結果との一致は、D129 と比べて認められなかった。

本稿で示した直接法による光学くさびの透過特性の点検時間は、1 波長組あたり従来法の約 1/3 の時間(約 1 時間)と短い。本方法を光学くさびの濃度勾配の変化監視に用いることにより、大幅な点検時間の短縮が可能となる。

直接法は、光学くさびの減衰特性を計算する際に、ランダムな点検結果の誤差(ばらつき)が現れる。この誤差を低減させることが今後の課題である。また、D129 及び D128 以外の測器でも同様に、従来法と直接法の点検結果が一致するかの調査、及び人為的な汚れを付着させた光学くさびを使って、その濃度勾配の変化を検出する調査が必要である。さらに、効率的な光学くさびの点検を実現するために、直接法の自動化を進める必要がある。

謝 辞

本稿を草するに際し、観測第三課の伊藤真人課長に数々のご助言を賜った。元熊谷地方気象台長の梶原良一氏からも有益なコメントを頂いた。アナログアンプの改修・製作にあたり、(株)アルファ電子の森川祥治氏に技術的情報と支援をいただいた。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 江崎雄治・押木徳明 (2013)：ドブソン分光光度計の光学くさびの透過特性。高層気象台彙報，**71**，27 - 32。
 気象庁 (1991)：オゾン観測指針 オゾン全量・反転観測編，気象庁，91pp。
 高層気象台観測第三課 (1996)：ドブソンオゾン分光光度計の自動化システムの開発。測候時報，気象庁，**63**，303 - 330。
 宮川幸治・能登美之 (1991)：自動化に対応した新 2 ランプ点検装置。高層気象台彙報，**59**，37 - 40。
 宮川幸治 (2002)：ドブソン分光光度計の新自動制御方式。高層気象台彙報，**62**，27 - 44。
 WMO (2009)；*Operations Handbook - Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer Revised 2008*, GAW Report No.183 (WMO TD No. 1469), 91pp.