

ドブソン分光光度計の光学くさび透過特性点検の改良と検証

藤原 宏章*・中野 辰美*・上野 圭介*

Improvement and Verification of the Method of Transmission Characteristics for the Optical Wedge of Dobson Spectrophotometer

Hiroaki FUJIWARA, Tatsumi NAKANO, Keisuke UENO

要旨

ドブソン分光光度計の光学くさびの透過特性を把握する手法のうち直接法について、点検の全自動化、暗電流の取り扱いの精緻化、S/N 比の小さなデータの除外を行うことで、より効率的で、高精度な点検が可能となった。この手法により 5 台のドブソン分光光度計を用いて精度検証を行い、いずれの測器に対しても再現性の高い点検結果が得られることを確認した。また、直接法は従来法(2 ランプ点検)と比較し、得られるデータの変化率の変動が大きいが、これは実際の光学くさびの透過特性の特徴を表現していることと示唆された。

直接法により G 表(光学くさびの濃度と放射照度の関係、R-N 表の基となる)を作成し、2 ランプ点検を用いてリニアリティの確認を行ったところ、直接法では光電子増倍管の出力損失の影響を受け、従来法と比較して積分された放射照度比の低下が見られたが、光電子増倍管のリニアリティ補正式を用いることにより放射照度比の低下を改善することができた。

1. はじめに

ドブソン分光光度計(以下、Dobson という)は、大気中のオゾンの総量(オゾン全量)を測定する測器であり、気象庁では 1957 年に使用を開始した。気象庁の Dobson によるオゾン観測データは、これまで 60 年以上蓄積されており、長期にわたる均質なデータとして世界的にも非常に貴重なものである。国内 3 箇所(つくば、札幌、沖縄)のオゾン観測測器は、2018 年 2 月にブリュワー分光光度計へ移行したが、南極昭和基地での定常観測及びつくばでの研究観測において、引き続き Dobson を使用している。また、気象庁では高層気象台が保有する Dobson のアジア地区準器の維持・管理も引き続き行っている。

Dobson によるオゾン観測は、①Dobson に入射した太陽光をプリズムで分光し、紫外域の 2 種類の波長を取り出す。②この 2 種類の波長のうち、長波長側を「光学くさび」に透過(減衰)させ、減衰の割合から 2 種類の波長の強度比を得る。③この強度比からオゾン全量を算出することにより行う。

光学くさびの形状は、細長い長方形をしており、光を透

過させるときに光学くさびの位置を変えることによって光の減衰する割合を変えることができる。光学くさびには、この減衰の割合が、指数関数的に変化するように、濃度の勾配がつけられている。長期的にオゾン観測の精度を維持するためには、定期的にこの光学くさびの透過特性(濃度勾配)の経年変化を確認する必要がある。気象庁では、透過特性の変化を監視するため、2 ランプ点検(以下、従来法という)を実施している(気象庁:2018)。

光学くさびの透過特性の点検手法の改善のため、江崎・押木(2013)は、光学くさびを透過する光の強さを直接測定する手法(以下、直接法という)を開発し、従来法では 1 波長組に 3 時間要した点検を 1 時間に短縮することができ、従来法と同程度の精度で透過特性を把握できることを報告した。また、江崎・押木(2014)は、光電子増倍管(以下、PMT という)の暗電流を遮断して測定することで、光学くさびの濃度勾配に関する点検結果の偏差を低減できることを報告した。

この直接法は、光学くさびの状態を直接評価するため、その手法の違いから、従来法では捉えられなかった光学くさびの透過特性を把握でき、気象庁がアジア地区準器の維持・管理や観測を継続する上で有効な点検手法とな

*高層気象台 観測第二課

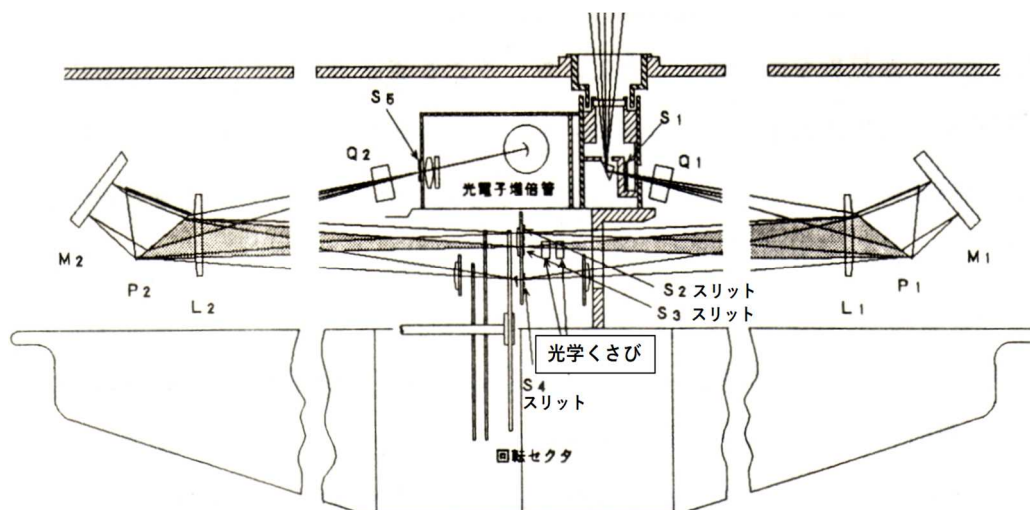


図 1 ドブソン分光光度計の内部構造

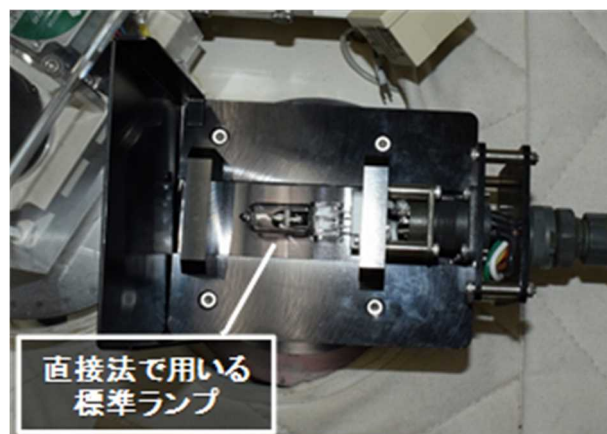
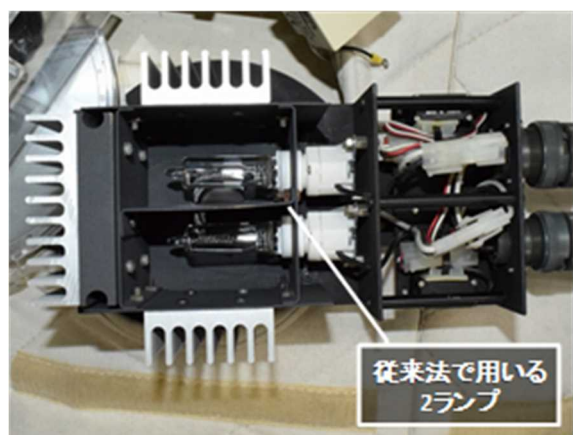
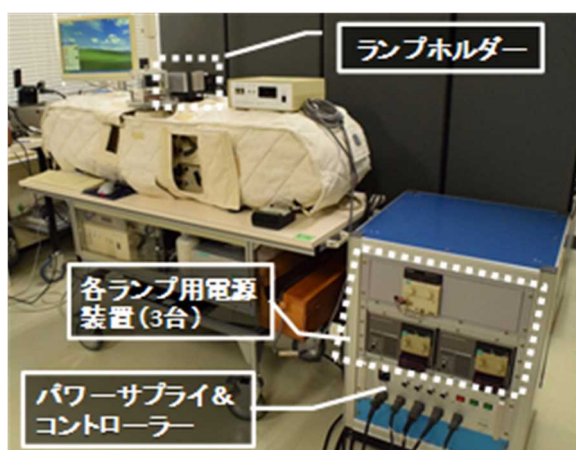


写真 1 上：2 ランプ点検装置，下：ランプ部拡大

ランプの下はシャッターとなっており，片方もしくは両方の光を導入することができる．どちらも 300W のタングステンハロゲンランプを使用．

写真 2 上：直接法で使した標準ランプ点検装置

下：ランプ部拡大

従来法と比べ，簡易な装置で点検が実施可能．ランプは通常の標準ランプ(200W)より高い照度を得るため，250W のタングステンハロゲンランプを使用．

り得る。また、直接法で用いる標準ランプ点検装置はドブソンの基本構成品であり、2 ランプ点検装置を保有していない国においても、オゾン観測の精度向上に役立てることが可能である。

一方、江崎・押木(2014)では直接法を用いるにあたり、以下の①～④の課題を挙げている。

- ① 光学くさびの透過特性を計算する際、ランダムな点検結果のばらつきが現れる。
- ② D129 では従来法とほぼ同様な結果が得られたが、D128 では得られなかった。他の測器においても検証する必要がある(D は Dobson を、3 桁の数字は測器番号を示す)。
- ③ 人為的な汚れを付着させた光学くさびを用いて検証する必要がある。
- ④ 直接法の自動化。

本稿では、光学くさびの透過特性の点検精度の向上、及び効率化を目的として直接法を改良し、上記の課題の解決を試みた。これに基づく直接法の試験結果の検証及び直接法の利点について取りまとめたので報告する。

2. 従来法と直接法の点検方法

2. 1 従来法(2 ランプ点検)

写真 1 に 2 ランプ点検に使用する各装置を示す。Dobson 入射口に 2 つのランプ(X, Y)を取り付けたランプホルダを設置する。2 つのランプはそれぞれ電源装置を有しており、コントローラーによって、各ランプの明るさや、X, Y ランプ用シャッターの開閉を制御している。また、測器内部には照度の基準となる S4 ランプがあり、このランプにも X, Y ランプと同様の電源装置が使用される。

X, Y のランプは、S4 ランプの光を基準として両者のランプの光量が等しくなるように調整する。これにより片側のシャッターを開けた場合の光量と比べ、両側のシャッターを開けた場合は正確に 2 倍の光量が得られる。

X, Y ランプの光は光学くさびを通過する S3 スリットを通り、S4 ランプの光は光学くさびを通過しない S4 スリットを通る(図 1 参照)。

2 ランプ点検の手順は次のとおり。

- ① 片側のシャッターを開けた場合の光量と S4 ランプの光量を一致させる。
- ② 両側のシャッターを開け、S3 スリットを通過する光量を 2 倍にする。
- ③ 光学くさびの濃度(光を減衰させる割合)を 2 倍にし、S3 スリットを通過する光量を減衰させて、S4 スリットを通過する光量と等しくする。光学くさびは、R ダイアルと呼ばれる測器上部の円盤と連動して

おり、R ダイアルの角度($0^{\circ} \sim 300^{\circ}$: 以下、R 値という)を大きくすることで光学くさびの濃度を高めることができる。理想的な光学くさびの場合、R ダイアルを $30.1^{\circ}(\log_{10}2 \times 100)$ 回すことにより、光学くさびの濃度が 2 倍となる。

- ④ S4 ランプの光量を段階的に変化させて測定することにより、光学くさび全体の透過特性が連続で得られる。なお、従来法の詳細については、宮川・能登(1999)を参照されたい。

Dobson は、R 値から 2 種類の波長の強度比(N 値)が得られる仕組みだが、実際の光学くさびは濃度勾配が一定でないため、R ダイアルを 30.1° 回しても光学くさびの濃度は 2 倍とはならない。このため、理想的な N 値となるように R 値を N 値に変換するための変換表(以下、R-N 表という。2 ランプ法等により作成された G 表に対し、準器との比較観測により原点をシフトしたもの)が用いられる。

2. 2 直接法

写真 2 に直接法に使用する各装置を示す。標準ランプ点検装置を設置し、標準ランプ(250W タングステンハロゲンランプ)の放射照度を一定に保ち、R ダイアルを一定の間隔で回転させて、光学くさびを透過する光を PMT の出力電圧として直接取得し、光学くさびの透過特性を評価する方法である。本稿では江崎・押木(2014)の更なる改良を試みた。次項以降でそれらについて述べる。

3. 直接法の改良、測定条件及び調査測器

本稿では、ランプの点灯、光量調整、データの読み込みの全工程を自動化し、効率的に試験結果が得られるように改良を行った。これにより、目視による読み取り誤差をなくし、作業の省力化及び点検時間が短縮された。自動化にはドブソン分光光度計自動制御プログラム(宮川：2002)や、UWSC(Windows の作業を自動化するツール)を利用した。

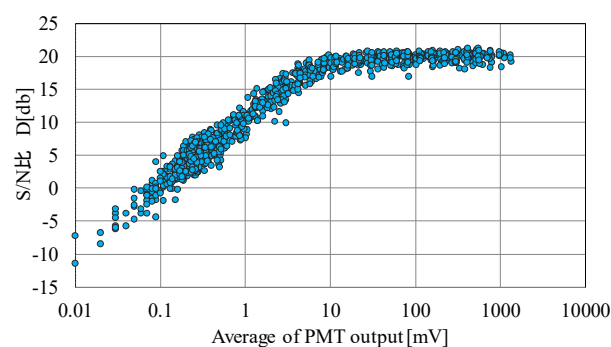


図 2 PMT の出力電圧(横軸)と S/N 比(縦軸)の関係(D127)

(1)測定条件

光源：250W タングステンハロゲンランプ

設定電圧：23V

設定電流：10A

波長組選択用操作棒の位置：LONG

測定波長：A, C, D 波長組の長波長側の紫外光を測定。

測定 R 値の範囲：

0～300°間を 5°間隔で 60°毎に往復測定(本稿では従来法に合わせて 5°間隔とした)。

60°測定ごとに暗電流を計測。

(2)調査に使用した Dobson

2018 年 12 月現在、気象庁が保有している Dobson は 8 台あり、このうち 7 台が高層気象台に集約されている。本稿では、アジア地区準器(D116)と、つくばの研究観測用測器(D125)を除いた全 5 台の Dobson を用いて試験を行った。

使用した Dobson の内訳は以下の通りである。

D122(南極昭和基地用。)

D126(2017 年 6 月まで札幌で使用。)

D127(2018 年 1 月まで那覇で使用。)

D128(2018 年 1 月まで札幌で代替使用。移動準器。)

D129(2005 年 3 月まで鹿児島で使用。)

4. PMT 信号の暗電流及びノイズの評価

4. 1 暗電流の影響評価及び補正方法

江崎・押木(2014)においては、直接法では暗電流の影響が無視できないとの報告がされている。この暗電流の影響は Windobson の機能により補正することができる。Windobson では、ATT(アッテネーター：PMT 感度を可変して、信号強度を調節する機能。最小が 0, 最大が 10 となる。)を 0 と 10 に設定し、それぞれの暗電流を予め計測し、0～10 までの暗電流を直線内挿で求め、PMT の出力電

圧から測定時の ATT における暗電流出力を差し引いている。本稿ではより精密に暗電流の影響を除去するため、Windobson による補正に加え、60°毎の計測前とその往復測定の折り返し時にその都度暗電流を求め、PMT の出力電圧のさらなる補正を行った。

4. 2 ノイズの評価及び ATT の調整

PMT の出力電圧は、目的としている信号、暗電流、そしてノイズの合成値である。PMT に入力する信号が微弱な場合、信号とノイズの比(S/N 比)が小さくなり測定精度が低下するが、Dobson は入力する信号(光)が微弱な場合、ATT を用いて信号を増幅し出力値を上昇させる機能を有している。本稿では、試験を行う前に PMT の出力電圧における S/N 比の調査を行った。PMT はダイナミックレンジが広いと、ここでは式(1)のデシベル(D)で評価を行った。

$$D[db] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (1)$$

ここで P_s , P_n はそれぞれシグナル(信号)とノイズの信号強度を示す。調査の結果(図 2), PMT 出力電圧が上昇するにつれてデシベル値が上昇し、PMT の電圧値が 10mV 付近からは 20db 付近でほぼ一定の値となった。本稿では S/N 比が大きい、すなわち精度の高いデータのみを用いるため、PMT の出力電圧が 10mV を下回ることを無いうよう ATT を調整しデータを取得した。

5. 直接法の精度検証

5 台の Dobson を用いて、従来法と改良した直接法の点検結果を比較し、直接法の精度について検証を行った。図 3 に D126 の A 波長組を、図 4 に Dobson5 台の測定結果を

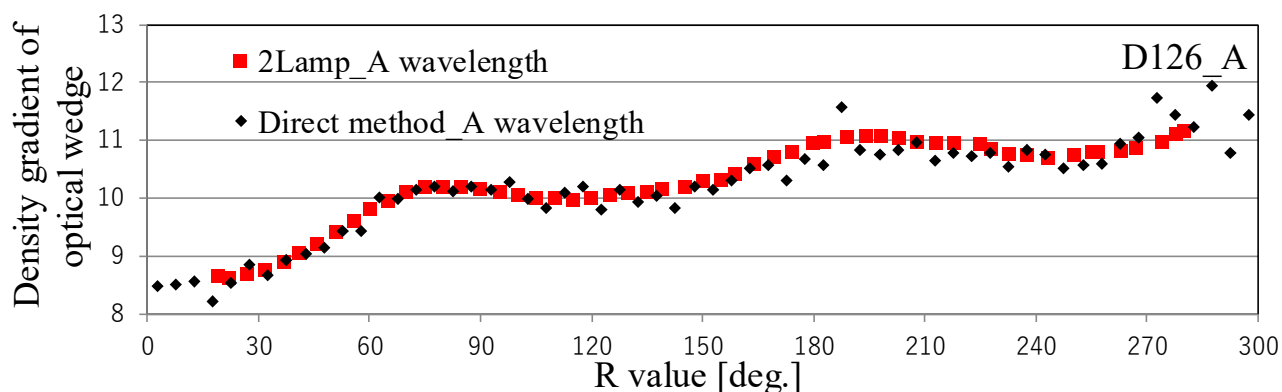


図 3 従来法と直接法の比較(D126 の A 波長組)

従来法は 2018 年 7 月 5 日、直接法は 2019 年 1 月 24 日の測定値を解析。横軸は R 値、縦軸は光学くさびの濃度勾配。

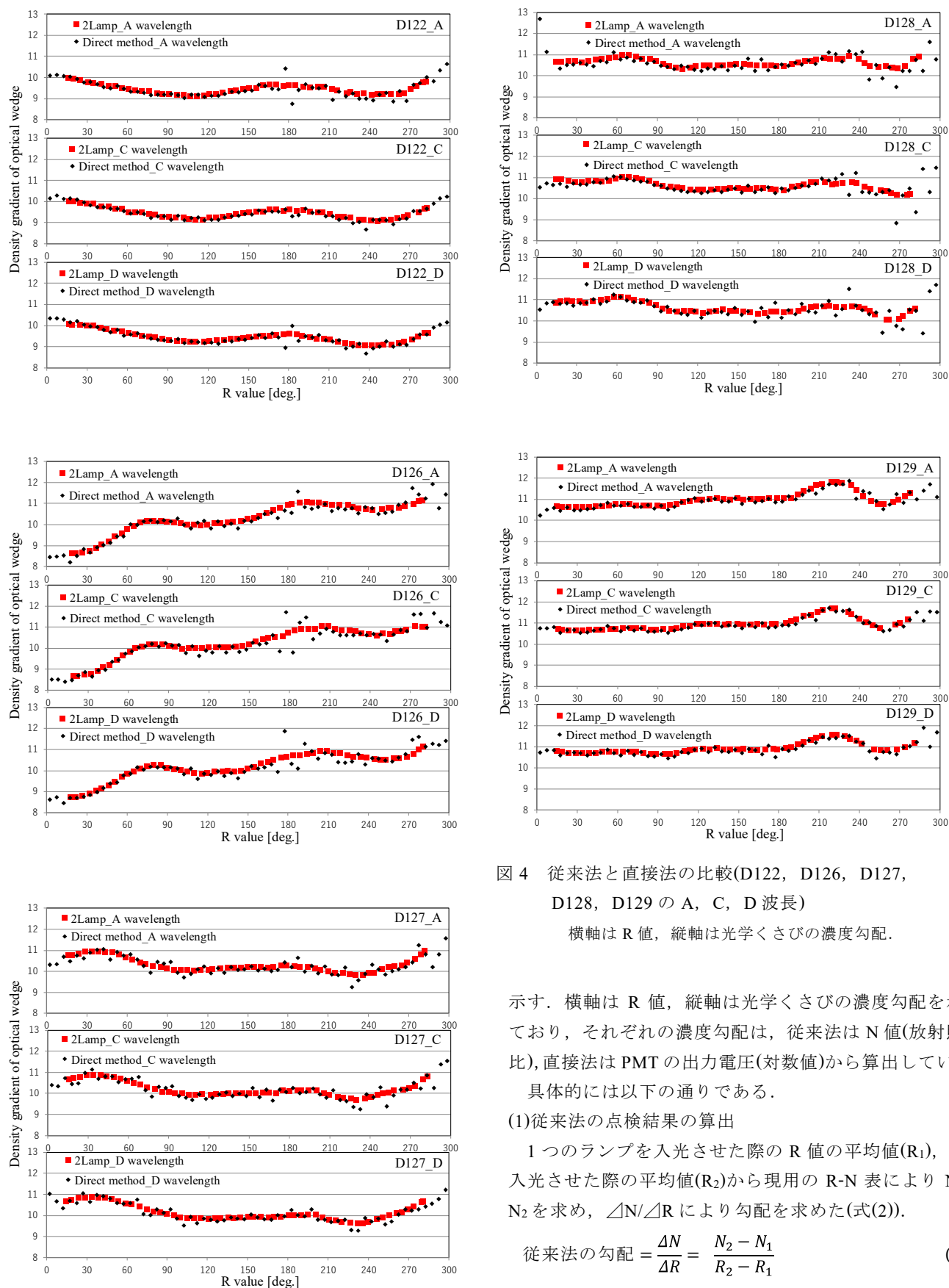


図4 従来法と直接法の比較(D122, D126, D127, D128, D129 の A, C, D 波長)

横軸は R 値, 縦軸は光学くさびの濃度勾配。

示す。横軸は R 値, 縦軸は光学くさびの濃度勾配を示しており, それぞれの濃度勾配は, 従来法は N 値(放射照度比), 直接法は PMT の出力電圧(対数値)から算出している。具体的には以下の通りである。

(1)従来法の点検結果の算出

1 つのランプを入光させた際の R 値の平均値(R_1), 2 つ入光させた際の平均値(R_2)から現用の R-N 表により N_1 , N_2 を求め, $\Delta N / \Delta R$ により勾配を求めた(式(2))。

$$\text{従来法の勾配} = \frac{\Delta N}{\Delta R} = \frac{N_2 - N_1}{R_2 - R_1} \quad (2)$$

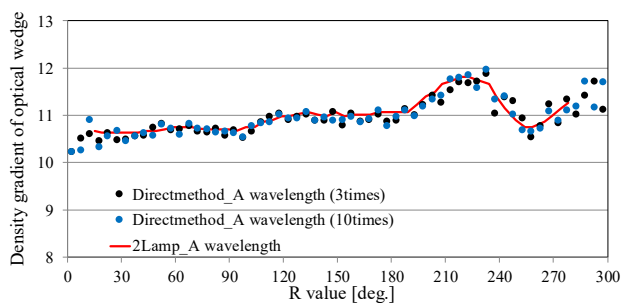


図 5 データサンプル数 6 と 20 の比較
(D129, A 波長)

横軸は R 値, 縦軸は光学くさびの濃度勾配。

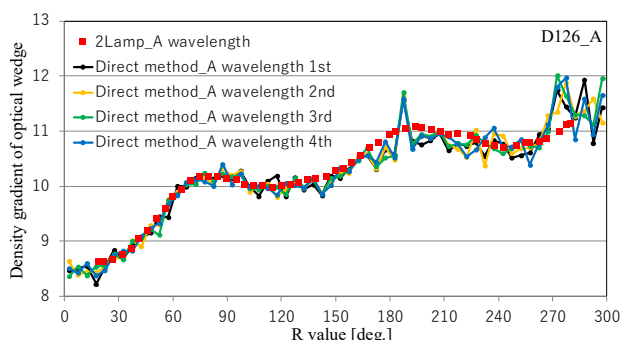


図 6 直接法を同条件で複数回行った結果
横軸は R 値, 縦軸は光学くさびの濃度勾配。

(2) 直接法の点検結果の算出

R_1 , R_2 の出力電圧 V_1 (mV), V_2 (mV) の対数から $\Delta \log_{10} V / \Delta R$ により勾配を求めた(式(3))。本稿では R ダイアルを 5° ごとに回してデータを取得したので $R_2 - R_1$ は 5 となる。

$$\text{直接法の勾配} = \frac{\Delta \log_{10} V}{\Delta R} = \frac{\log_{10} V_2 - \log_{10} V_1}{R_2 - R_1} \quad (3)$$

(3) 横軸

横軸の R 値は, R_1 と R_2 の中間値とした(式(4))。

$$\text{横軸}(R) = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (\text{共通}) \quad (4)$$

このグラフから, 従来法と直接法の点検結果はよく一致しており, 直接法は従来法の代替となる点検方法として十分有効であると判断できる。但し, 図 3 の $R=170 \sim 190^\circ$ 付近及び 260° 以降において顕著なばらつきが見られ, 全体的にも従来法に比べて直接法のデータには細かい変動が見られる。このデータの変動については江崎・押木(2014)の報告でも指摘されている。

変動の原因として, 従来法では 1 カ所の濃度勾配を測定するのに約 5 分の時間をかけ, データの安定する後半の 100 秒程度のデータを用いているのに対し, 今回行っ

た直接法では 1 カ所につき約 30 秒測定するのみであることが考えられる(約 5 秒で 1 つのデータを取得, 計 6 つのデータを平均して用いる)。変動の原因が, 測定時間が短いことによる不確かさである場合, データ取得時間(数)を増やすことで改善すると考え, 取得するデータ数を 6 から 20 個に増して同様の試験を行った(図 5)。その結果, 標準偏差はサンプル数が 6 及び 20 個の場合ともに 0.20 となり, 変動の大きさは変わらなかった。

次に, 変動の原因が測定の非安定性による不確かさであった場合, 試験を行うたびに変動の傾向が変わるはずであると考え, 同じ条件の試験をさらに 3 回実施し, 比較を行った(図 6)。その結果, 細かな変動だけでなく, $R=185^\circ$ や $R=270^\circ$ 付近で見られた特徴的な変動がいずれの試験においても認められた。このことは直接法が再現性の高い点検方法であることを示している。

これら 2 つの結果から, データの変動は測定誤差ではなく, 実際の光学くさびの特徴を表現していると考えられる。

6. G 表の比較及びリニアリティ補正

6. 1 従来法と直接法で作成した G 表の比較

オゾン観測に用いられる R-N 表の基となる G 表(光学くさびの濃度と放射照度比の関係表)は, 従来法により決定している(廣瀬: 1986)。

G 表は直接法で取得したデータからも作成することができる。図 7 は, 従来法と直接法により作成した G 表の, 従来法による G 表の近似直線(濃度勾配を一定と見なしたものと同義)からのそれぞれの偏差を示す。従来法の算出には通常使用している自主開発プログラム(Rn_cal.exe)を使用した。

6. 2 従来法の問題点

図 7 から, 従来法の偏差(紫線)には約 30° 周期の変動が見られるのに対し, 直接法(緑線)ではそのような周期変動は見られない。なお比較のため, 従来法は特に変動の大きなものをピックアップした。

従来法から作成された G 表は, 光量を 2 倍にした際の光学くさびの濃度の差(R 値で約 30° の差)を用いて求めるため, ある R 値に対する N 値の算出においては, $R+30^\circ$ 付近の光学くさびの状態の影響を受けることになる。そのため, 作成される G 表には約 30° の周期変動が加わる場合がある。観測に使用する R-N 表を求める際は, このような周期変動が R-N 表に影響することが無いよう複数回の測定や, 測定誤差の範囲内での手動によるデータ補正を行い, この周期変動による観測への影響を抑えている。し

かし、手動によるデータ補正は、実際の光学くさびの特性もスムージングしてしまう可能性があり、また客観性にも疑いが生じる場合がある。

6. 3 直接法の問題点

図 7 において、R 値の増加にともない直接法と従来法の偏差の差が拡大しているのがわかる。G 表は R 値ごとに決定した N 値を積分したものであるが、直接法の G 表は PMT のリニアリティ (直線性) の影響を受け、R 値が大きくなるにつれて光学くさびの濃度勾配の積算値が実際の値より小さくなっている可能性がある。

直接法は、ランプの光量と ATT 値を一定に保ち、R 値を一定間隔で変更し、それぞれの R 値における PMT の出力電圧から濃度勾配の傾きを求める手法である。そのため、PMT の出力のリニアリティ特性の影響を受け、光学くさびの濃度勾配が一定であっても PMT の出力が一定の勾配とならず、実際の出力電圧と差異が生じると考えられる。一方、従来法は 30°毎に 1 つのランプと 2 つのランプで同じ PMT 出力電圧となる R 値を検出する手法であるため、PMT 出力のリニアリティは問題とならない。

6. 4 PMT のリニアリティ補正及び G 表の作成

直接法のリニアリティ補正を行うため、PMT のリニアリティ特性調査を行った。手法は次の通りである。

- ① 従来法で使用する 2 ランプ点検装置を用いて、R 値を一定にし、X ランプ、Y ランプ、XY ランプの順で繰り返し測定を行い、測定データから X ランプと Y ランプの照度の合計値(X+Y)と、X と Y を同時に入光させた照度 (XY) との比 ($XY/(X+Y)$: 以下、照度比という) を求める。
- ② ATT を調整して PMT の出力電圧を段階的に変化させ、①の手法により照度比を求め、リニアリティの変化を確認する。

結果を図 8 の青線に示す。PMT のリニアリティに問題がなければ出力電圧が上昇しても照度比は 1 となるはずであるが、出力電圧(光量)が大きくなるにつれ照度比が低下しており、入射する照度が大きくなるにつれて、PMT の出力電圧が低下しているのが見てとれる。

PMT の出力の非線形性については、製造会社(浜松ホトニクス(株))の技術資料(https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMTModules_TPMO0011J.pdf)によると、以下の手法で補正が可能であるとされている。

$$V = v / (1 - vt) \quad (5)$$

V : 真の出力電圧, v : 測定した出力電圧, t : パルスペア分解能(個別に分離計数できる出力パルスの最小時間間

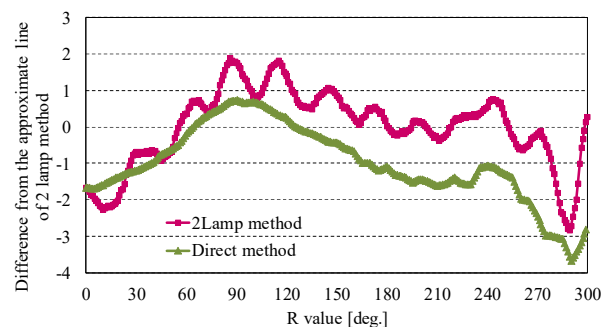


図 7 従来法と直接法により作成した G 表と、従来法により作成した G 表の近似直線からの偏差(D128, D 波長).

横軸は R 値, 縦軸は差。

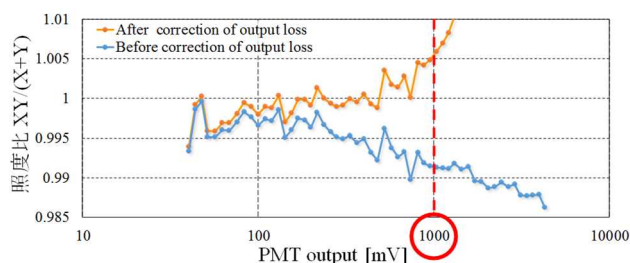


図 8 PMT リニアリティ試験の結果(青線)と、出力電圧補正後(オレンジ線)の比較(D128).

横軸は PMT 出力電圧, 縦軸は照度比を示す。

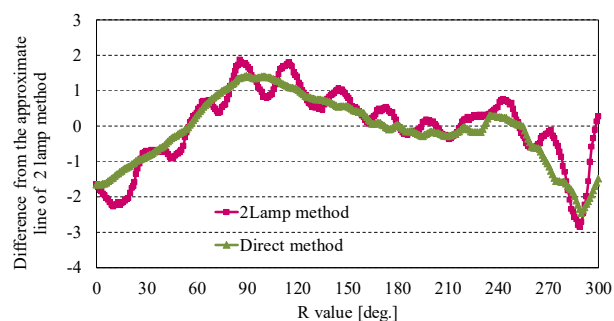


図 9 図 7 の直接法に出力電圧補正を施したもの(D128, D 波長).

隔)

Dobson では PMT を直流計測方式で用いている。式(5)は PMT を光子計数方式を用いて測定した際に用いられるものだが、試しにこの式により補正を施し、照度比の計算を行った(図 8)。その結果、補正後のデータ(オレンジ線)は電圧値が高くなるにつれて過大な補正となっていくが、使用するデータは 1000mV 以下であり、その範囲において補正後の照度比は 1 に近い(概ね±0.5%以内)。今回の試

験結果にこの補正を施し図 7 と同様にして G 表を比較すると、負偏差が大幅に改善された(図 9)。

図は省略するが、他の Dobson においてもこの補正手法を用いることで、PMT の出力損失の影響による G 表の負偏差が解消することを確認した。

なお、この PMT の出力損失は、図 3～図 6 においても従来法と比べ濃度勾配がわずかに低めにでていることで影響が確認できる。光学くさびの透過特性の経年変化を確認する目的においては、点検ごとの相対的な比較を行えばよいため補正を行う必要は無いが、従来法の点検結果と比較を行う場合は、上記と同じ手法によるリニアリティ補正が有効である。

7. まとめ、考察

本稿では、光学くさびの透過特性の点検方法として、江崎・押木(2014)が開発した直接法の改良を行い、点検精度の向上及び効率化を目的として試験を行った。その結果および考察は以下のとおりである。

(1)直接法の有効性

本稿では、江崎・押木(2014)で課題として挙げられていた点検の全自動化を行い、効率的な点検が可能となった。Dobson5 台を用いて、自動化した直接法の点検結果について精度検証を行い、いずれに対しても再現性の高い結果が得られた。精度が向上した要因は、自動化を行うことにより目視による読み取り誤差が無くなったこと、PMT 出力電圧の最適化を行うことで暗電流の取り扱いを精緻化したこと、S/N 比の大きなデータのみを取得したことである。直接法により取得されたデータには、従来法と比較して細かい変動が見られるが、変動の原因は測定の非安定性による誤差ではないことが確かめられ、直接法は PMT の出力電圧値で光学くさびのその場所そのものの透過率の状態を直接評価する手法であることから、実際の光学くさびの光学特性を表現しているものと考えられる。

(2)従来法と直接法による G 表の比較

従来法から作成した G 表は、2 倍の光量を利用して、R 値で約 30°の差を用いて求めるため、約 30°の周期の変動が出現しやすい。また従来法では R と R+30°の差をもとに、±15°の範囲の移動平均で G 表を算出するため、細かい光学特性を十分に表現できない可能性があり、評価が可能な範囲は 15°～285°に限られることから、15°以下と 285°以上は外挿による推定値となる。一方、直接法は光学くさびの状態を直接評価するため、出力電圧の変動は実際の光学くさびの透過特性を表現しているといえ、さらに 0～300°までの濃度勾配を評価することが可能である。

(3)直接法のリニアリティ補正及び比較結果

直接法による G 表は PMT の出力損失の性質により、従来法にくらべ R 値が増加するに従い負の偏差があらわれるが、PMT のリニアリティ補正を施すことで、積分誤差が小さくなり偏差が大幅に改善することが確認された。

(4)考察

直接法は、今後、Dobson による研究観測や、光学くさびの特性変化の監視や、過去データの再評価を行う際、各測器の特性を把握するうえで、効率性・再現性の面から有用な手法となり得る。

謝 辞

本稿を草するに際し、高層気象台長をはじめ、高層気象台観測第二課の皆様には多大なご協力を賜りました。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.
- 江崎雄治・押木徳明 (2014): 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. 高層気象台彙報, **72**, 39 - 44.
- 浜松ホトニクス(株) (2019): 光電子増倍管モジュール. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMTModule_s_TPMO0011J.pdf (2019.3.1 閲覧)
- 廣瀬保雄 (1986): 2 ランプ検定データからドブソン分光光度計の R-N 表を作成する方法について. 高層気象台彙報, **46**, 36 - 41.
- 気象庁 (2018): オゾン観測指針 オゾン全量・反転観測編, 気象庁, 83pp.
- 宮川幸治, 能登美之 (1999): 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.