

天頂雲検出器の反転観測への導入

宮川 幸治*・上野 圭介*

Introduction of Zenith Sky Cloud Detector for Umkehr Measurement in Dobson Spectrophotometer

Koji MIYAGAWA and Keisuke UENO

Abstract

The Zenith Sky Cloud Detector (ZSCD) was developed to detect clouds present in the zenith sky. The Japan Meteorological Agency (JMA) incorporated the ZSCD into the ozone observation network to achieve real-time quality control of Umkehr observation in 2007. A Dobson spectrophotometer is used as one of the instruments for accurately monitoring the ozone layer, and JMA is performing regular observations at Sapporo, Tsukuba, Naha, and Syowa in the Antarctic. The Dobson spectrophotometer monitors the ozone layers of the Earth's atmosphere. However, the accuracy of Dobson measurements depends on the presence of clouds in the Zenith Sky. ZSCDs for detecting clouds were first developed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in the 1980s. ZSCDs use an 862nm (center wavelength) interference filter for the near-infrared region and can detect light scattered by the main clouds at Zenith. This optical device is composed of an interference filter, a lens, its aperture, and a high-sensitivity, near-infrared photodiode. The amplified output is input through the A/D interface of the Dobson automated system. The Umkehr observation using ZSCD modifies the influence of clouds and can help achieve a good ozone profile. JMA developed this unit based on the ZSCD used for the Global Atmosphere Watch (GAW) ozone observation network in NOAA. The effect of the clouds of measurement N-value can evaluate the clouds using the standard deviation from time series of ZSCD output.

1. はじめに

オゾン層を正確に監視する測器の一つとして、ドブソンオゾン分光光度計(以下、ドブソン分光計と記す)が全球大気監視(GAW)の世界のオゾン観測網で利用されている。気象庁は1957年(那覇は1974年)以降、札幌、つくば(館野)、鹿児島(2005年3月で終了)、那覇、南極の昭和基地において定常的なオゾン観測を実施している。ドブソン分光計では、オゾン全量観測と反転観測によるオゾン量の観測を行っており、特に高度約20km以上のオゾン鉛直分布の観測データはその長期トレンドの監視等、オゾン研究で重要な役割を果たしている。反転観測は、午前または午後の晴天時に、ドブソン分光計を利用して天頂から入射する二つの紫外線波長を選択し、その相対強度を測定することにより行われる。測定は、A(305.5/325.0nm)、C(311.5/332.4nm)、D(317.5/339.9nm)の波長組のうち通常C波長組を用いたLong反転法で、太陽天頂角(SZA) 60°～90°

の間で連続して行われる。しかし、測定の強度比は天頂の雲による散乱光の状態に依存するため、その影響を正確に把握しオゾンの観測精度を向上させることが重要である。

天頂の雲検出器(以下、天頂雲検出器またはZSCDと記す)は、反転観測中の天頂の雲を検出し、測定データを修正する目的で1980年代に米国海洋大気庁(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)により開発された測器である(Guerrieri : 1985)。この天頂雲検出器は、主に天頂の雲によって散乱される光を検出する。太陽からの放射エネルギーは、地表面に達するまでに水蒸気、二酸化炭素、酸素やオゾンによる吸収と散乱の影響を受けている。天頂雲検出器の測定波長にはこれら各吸収気体での固有の吸収帯が存在しないような近赤外領域を選び、その放射強度から雲による散乱光を検出することができる。今回導入した天頂雲検出器は、NOAAからの技術協力を得て開発製作したものである。

本稿は今回開発した天頂雲検出器について、その構成

*高層気象台 観測第三課

と取得した測定データの若干の解析結果について報告する。なお、放射用語の定義は廣瀬・下道(1996)に説明されている。

2. システム構成

本装置の光学系は、862nm(中心波長)の干渉フィルターと近赤外領域に高い感度を持つフォトダイオード、レンズ、絞りで構成される。また、天頂雲検出の信号は、ドブソン自動化システム(宮川：2007)のインターフェースを利用して接続され、反転観測の測定データと共にデータ処理される。

2.1 光学システム

大気中の粒子による太陽放射の散乱は、レーリー散乱(気体分子)とミー散乱(エアロゾル・雲等)に大別される。ドブソン分光計で測定される二つの波長の天頂光は、共に雲によって放射強度が強化されるが、この強度が異なるため測定される強度比(C波長組の場合 311.5nm と 332.4 nm の強度比)は不確実な値となる。天頂雲検出器の目的はこのドブソン分光計の不確実な強度比に対して値を正しく修正することであり、反転観測中に天頂が雲に覆われていると判断した場合それを修正または削除することが可能である。ドブソン分光計は天頂から±3.5°の地球大気の大円錐状の視野を持っている(Fig.1)。このため天頂雲検出器はドブソン分光計の反転観測時の雲監視として利用するため、同じ円錐状の視野を持つ構造で設計してある。なお、以下の光学システムの測定原理および基本的な構造に関しては、Guerrieri(1985)の論文に基づいている。

天頂雲検出器の光学システムでは、以下の二つの目的を達する必要がある。第一に適切な測定波長を決定すること。これには干渉フィルターが利用される。第二にフォトダイオードのセンサー検出面積を定義すること。これはレンズと絞りにより決定することができる。

大気構成分子による太陽放射のレーリー散乱係数 $Br(\lambda)$ は波長の 4 乗にほぼ逆比例し、(1)式で定義される。つまり波長がより長いほど、レーリー散乱の影響がより小さくなる。

$$Br(\lambda) \propto 1/\lambda^4 \quad (1)$$

一方、大気中のエアロゾル粒子は、その多くが対流圏低層に存在し、レーリー散乱と同じく太陽放射を散乱する。エアロゾル粒子の大きさは様々であるために、波長によってその散乱を受ける影響の程度は異なる。大気中のエアロゾルによるミー散乱係数を $Ba(\lambda)$ とすると、大気中

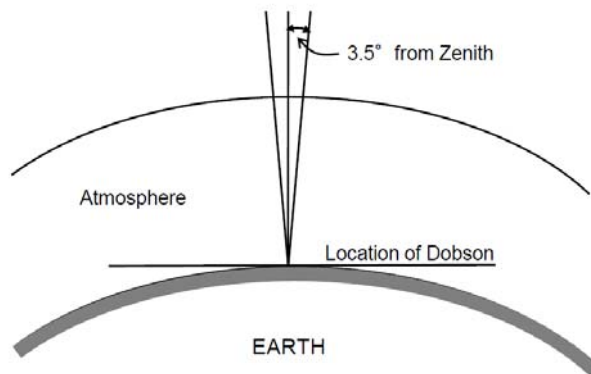


Fig. 1 Two-dimensional illustration of the atmosphere for Dobson's field of view.

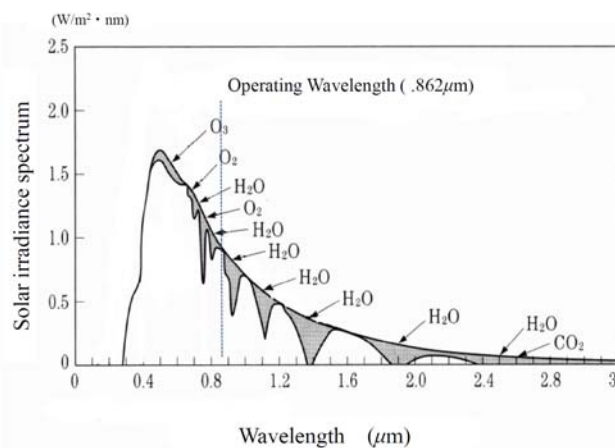


Fig. 2 Spectral distribution of solar radiation of the Earth's surface showing water vapor bands. This figure was revised from AFCRL Handbook of Geophysics and Space Environments (1965).

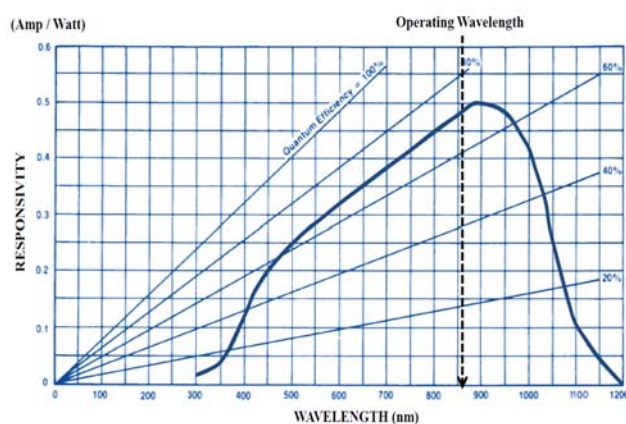


Fig. 3 Typical response for photodiode. Responsively: 0.5 Amp/Watt at 862nm. From the specifications of photodiode.

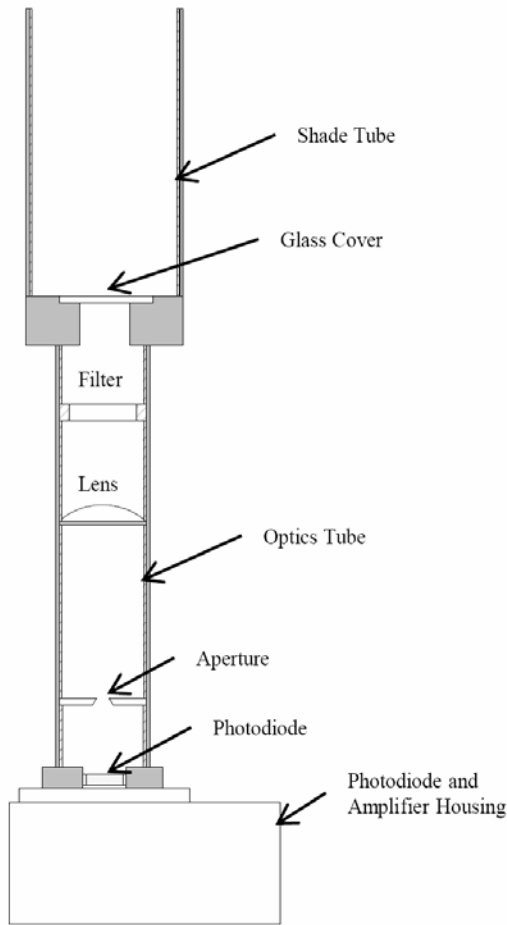


Fig. 4 Diagram of assembled optics section.

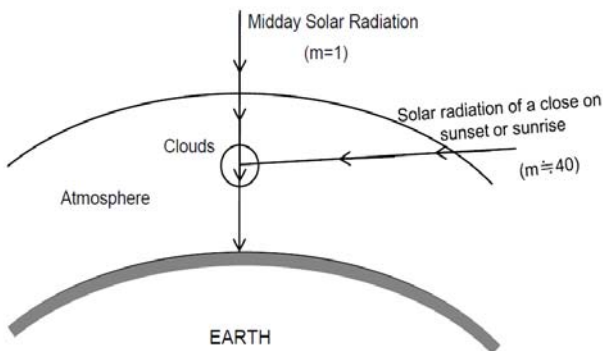


Fig. 5 Illustration of the different amounts of atmosphere through which solar radiation travels.

の代表的なエアロゾルの粒径(数 μm から $0.01\mu\text{m}$ 程度)では近似的に波長の 1.5 乗に逆比例し(2)式で定義される。レーリー散乱のように波長依存性は強くないが、より長い波長でエアロゾルの散乱の影響がより小さいことを示す。

$$Ba(\lambda) \propto 1/\lambda^{1.5} \quad (2)$$

地表面での太陽放射エネルギースペクトルは、大気中の水蒸気、二酸化炭素、酸素やオゾンなどによる特定波長吸収帯を持っている(Fig.2)。天頂の雲検出のためには、これら各気体による固有の吸収帯が存在しない赤外領域の波長を利用する。採用したエドモンド社の干渉フィルターは、測定中心波長 862nm 、半値幅 $10 \pm 2\text{nm}$ 、外径 $\phi 25\text{mm}$ の狭帯域タイプである。

また、フォトダイオードのセンサー検出面積の定義は、レンズと絞りの関係で決定される。Fig.1 で示したように天頂雲検出器の測定視野半角を α とすると、次の関係式で定義できる。

$$\frac{D}{2f} = \tan \alpha \quad (3)$$

ここで、 α を 3.5° に設定、 f はレンズ焦点距離、 D は絞り開口部の直径を示す。天頂雲検出器ではレンズの焦点距離 $f=50\text{mm}$ を使用し、(3)式により絞りの直径を 6.12mm とした。

フォトダイオードは、測定波長の近赤外領域 $600\text{nm} \sim 1000\text{nm}$ に高い感度を持つ RS 社製 OSD100-6 (Fig.3) で、検出窓 $\phi 10\text{mm}$ のものを使用した。干渉フィルターからレンズ、絞りからフォトダイオード間の距離設定については、これらの関係に特別な制約はない(Fig.4)が、本装置では 30mm とした。装置上部の光の取り込み窓は、近赤外線領域での透過率にも優れている石英ガラスを使用し、湿度や埃などから内部を保護した。これらの光学系は精密な特殊加工と共に、内部表面の散乱防止のコーティング処理、シーリングによる完全防水機能を施している。

2.2 電子系システム

電子システムの主な目的は、フォトダイオードで検出される光子エネルギーを直線的な電圧出力に変換することである。PN 接合型のフォトダイオードは、光起電力効果に基づき弱光の検出に対してより高感度で動作する。また、フォトダイオード OSD100-6 の出力は、入射光に比例した電流に変換される。その出力は、フォトアンプにより適切な感度で増幅される。赤外線領域における地表面での

太陽放射エネルギーは非常に弱く、更に太陽天頂角の大きい日の出(日の入り)時には大気を通過する路程(大気路程: m)がおおよそ 40 で僅かな放射エネルギーとなる(Fig.5). また、フォトダイオードは若干のバックグラウンドノイズを伴っているため、これらの影響を最小限に抑える対策を施した電子回路で設計される。フォトアンプでは、OPアンプにより電流-電圧変換されるため、約 1000 倍の倍率までリニアリティと低ノイズが期待される。感度は反転観測時の太陽天頂角 $60^\circ \sim 90^\circ$ (大気路程 $m=2 \sim 40$) の範囲で、3.4 で後述するように大気の透明度に応じた測定感度や Fig.5 の雲など考慮して適切な倍率に調整する。オフセットはフォトアンプ出力の暗電流をゼロ調整する。

フォトアンプへの供給電源は、測定信号へ及ぼすノイズの影響を抑えるため、 $\pm 12V$ スイッチング電源を外部に設けた。入力信号は、ドブソン自動化システム(宮川: 2007)の A/D インターフェースの $0 \sim 10V$ チャンネルを利用して取り込まれる。反転観測プログラムは、これらの電圧信号を収集し保存する。Fig.6 に天頂雲検出器の電子回路の系統図を示す。

2.3 装置概観

Fig.4 は、天頂雲検出器全体の光学システムの概観を示す。光学筒とフード、フォトアンプボックスを含む高さは 510mm である。フォトアンプボックス外側にはオフセット調整及び感度調整用の調整口を設けた。本装置は、専用オゾン観測ドームや室内の天窓を利用した施設を考慮し、ドブソン分光計の天頂光観測のフード近傍に設置できる構造とした。

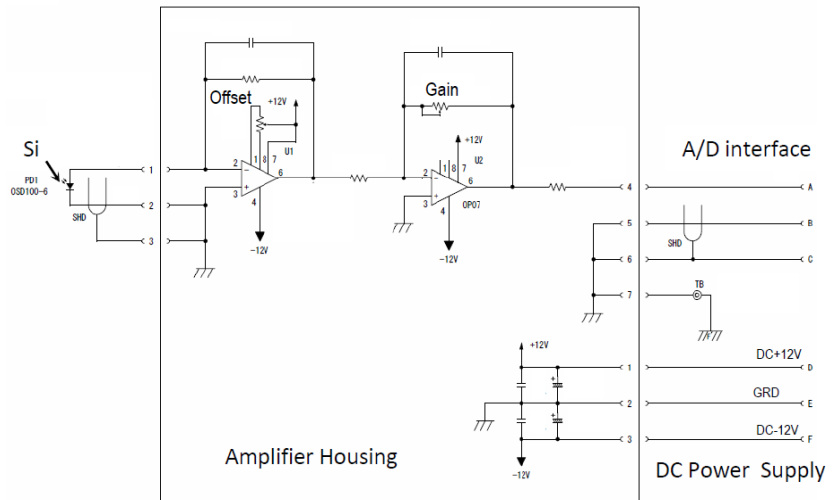


Fig. 6 Circuit diagram of the ZSCD photo-amplifier

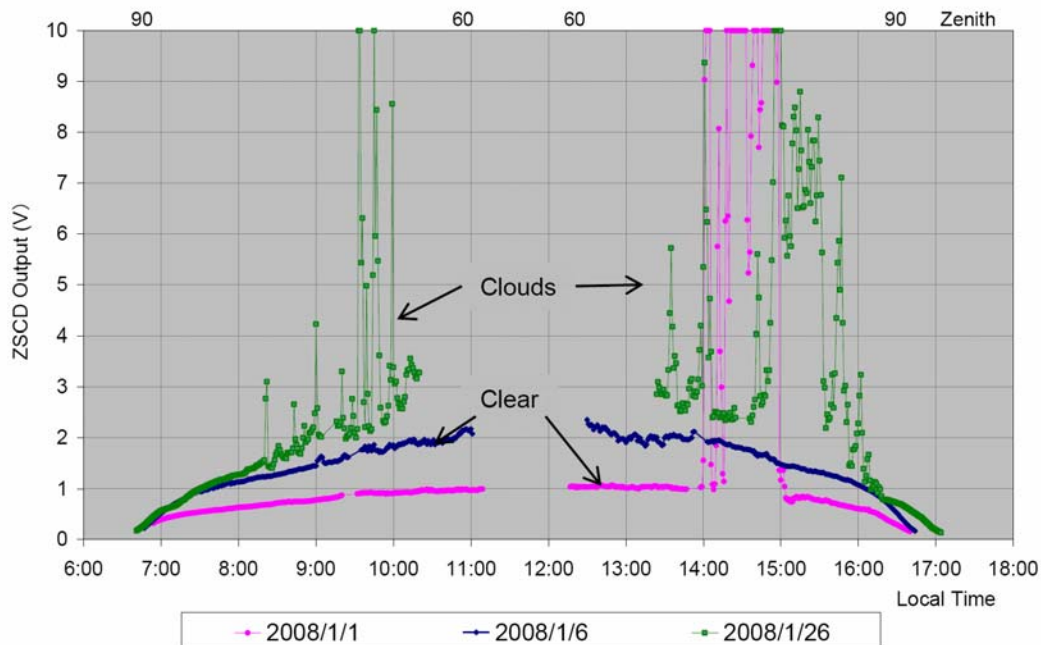


Fig. 7 Typical outputs of ZSCD for clear days and cloudy days at Tsukuba in January 2008. The lowest line of output result indicates the day when the atmosphere is the clearest in all data.

3. 測定結果とその評価

2007 年に開発した天頂雲検出器は、様々な動作試験と調整を経て、2007 年 7 月からつくばにおいて反転観測への導入を開始した。2008 年 1 月からは那覇にも導入された。2007 年 7 月から 2008 年 1 月末まで、約 160 例の観測データがつくばで取得された。以下、それらの測定結果から天頂雲検出器の特徴を考察する。

3.1 天頂雲検出器の出力結果

Fig.7 に実際の観測で得られた天頂雲検出器からの典型的な 3 日分の出力電圧(以下、出力結果と記す)を示す。図中には天頂に雲が全くない場合と下層で雲の通過があった場合をそれぞれ Clear/Clouds で表す。2008 年 1 月 26 日の午前の層積雲(Sc)と午後の絹雲(Ci)の天頂通過がある例では、天頂雲検出器の出力結果が大きく増大し、雲によって散乱光が増加したことが明瞭に見て取れる。一般に雲の有無は目視によって判断する。目視で天頂に雲なしの晴天時の例として、1 月 1 日と 1 月 6 日の結果も同 Fig.7 に示しているが、日の出(日の入り)を除く全ての時間帯で両日の出力結果は系統的にほぼ 2 倍の差がある。この主因として様々なエアロゾルによる大気の影響の違いが考えられる。大気の影響具合を示す大気混濁係数は、全取得データ(約 160 例)で 1 月 1 日が最小であった。

天頂雲検出器の 1 月 1 日の出力結果は、日の出から 14 時頃まで滑らかな変化を現している。しかし、午後 14 時から 15 時頃に下層で層積雲(Sc)の天頂通過があり、その

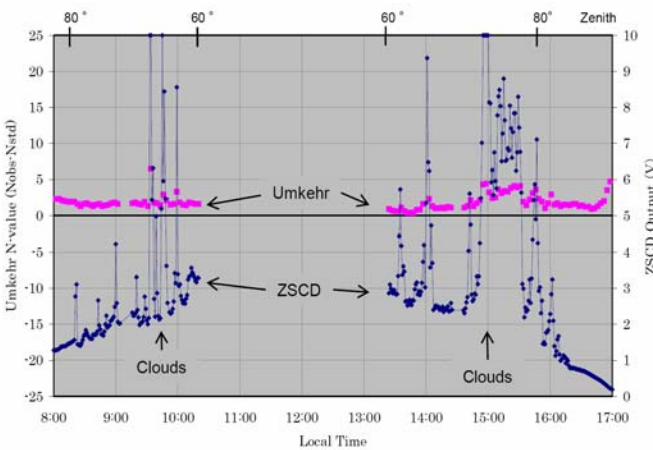


Fig. 8 Relation between ZSCD output and measured N-value in Umkehr observation on January 26, 2008. The Umkehr observation indicates the difference between N-value and N-standard (red line). The ZSCD output indicates the passage of clouds (blue line).

影響で大きく出力が変化している。1 月 6 日の例では多少の変動を伴っており、後述の大気の影響状態の変動を反映していると考えられる。また、雲がない場合の出力結果は、薄明時に比べて南中時間帯で高い傾向を示す。これは薄明時から南中時間帯にかけて、時間と共に地球大気を通過する路程が変化することによって、太陽放射エネルギーのレーリー散乱が変わることに起因する。

3.2 天頂雲検出器の出力結果と測定N値の関係

天頂雲検出器での出力結果と反転観測の測定N値(Nobs)の関係について、2008年1月26日の観測事例で示す(Fig.8)。ドブソン分光計の自動化システムは、反転観測の測定N値の修正を容易にするため基準値(北半球中緯度45°の標準的なオゾン鉛直分布に対応したN値: Nstd)との差

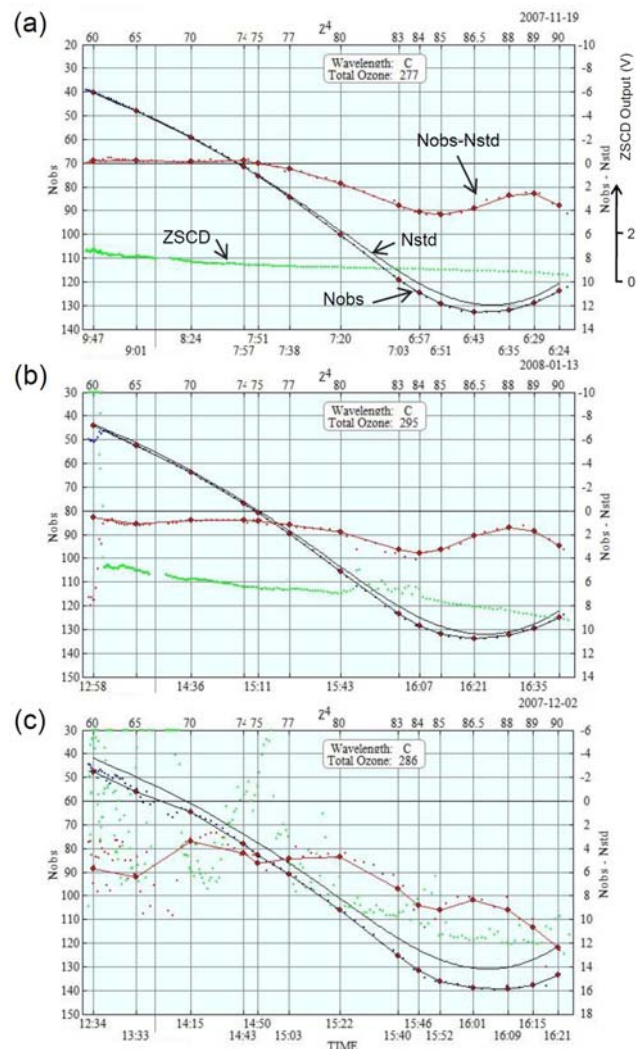


Fig. 9 Measured N-value and ZSCD output for Umkehr observation. (a) Clear day. (b) Partially cloudy zenith. (c) Cloud-covered zenith.

を利用して品質評価を行っている。測定N値と基準値の差(Nobs-Nstd)が滑らかに変化するなら雲による影響が少ないと一般的には判断できる。天頂雲検出器の出力結果(図中のZSCD, 青)が大きく変化している10時前と15時前後に着目すると、Nobs-Nstd(Umkehr, 赤)には多少の変化が現れているにすぎない。一方、天頂雲検出器の出力結果は、雲なしのレベルと比べて高い出力結果が断続的に現れている。このことから、反転観測において雲の影響を受けていると判断される測定N値の修正や測定点の削除は、天頂雲検出器の出力結果の時系列変化を評価することで、客観的に処理することが可能である。しかしながら、目視での確認が困難な初期の絹雲(Ci)や層状雲のような場合、天頂雲検出器の出力結果の変化が比較的小さく判別が難しいこともある。このような事例は測定N値への影響が極めて少ないことなど修正の必要はないと判断できる。

ドブソン自動化システムでは、反転観測の測定データと同時に天頂雲検出器からの出力結果を0.2秒毎に取り込み20秒平均(正分の前後20秒間)した値を毎分値として収録している。Fig.9に雲の影響が全くない場合(a)、時々雲の通過があるものの天頂雲検出器により修正されている場合(b)、そして雲による影響を修正しない場合(c)の3例を示す。Fig.9(a)は、測定N値への修正を必要としない理想的な測定結果を示し、測定N値との差Nobs-Nstd(赤)と天頂雲検出器の出力結果ZSCD(緑)が共に滑らかに変化している。Fig.9(b)では、太陽天頂角60°付近と83°付近で両測定の結果に変化が見られる。高積雲(Ac)の天頂通過を伴う太陽天頂角60°付近の場合は天頂雲検出器の有無にかかわらず従来の測定N値のみで修正は容易であるが、絹雲(Ci)の天頂通過に伴う83°付近の場合測定N値のみで客観的な修正は困難である。天頂雲検出器の出力結果の雲による変化は明瞭であり、天頂雲検出器の出力結果の時系列から雲の影響を受けている時間帯を特定でき、該当時刻の測定N値の修正が可能であることが分かる。また、Fig.9(c)は太陽天頂角60°～90°の全てにわたり測定N値との差および天頂雲検出器の出力結果に大きな変化を持っている。これは12時から14時頃に層積雲(Sc)の天頂通過がありその後上層雲のCiが日没まで全天を覆ったことに伴う。この結果は測定N値の修正または削除の範囲を超えており、オゾン鉛直分布を算出するには不適切な例である。

3.3 出力結果の考察

天頂雲検出器の導入後に得られた164例の毎分の出力結果と太陽天頂角の関係をFig.10(a)に示す。反転観測の測定N値と共に得られたこれらの結果には、測定N値の修正が困難でオゾン鉛直分布の不採用データも一部含まれてい

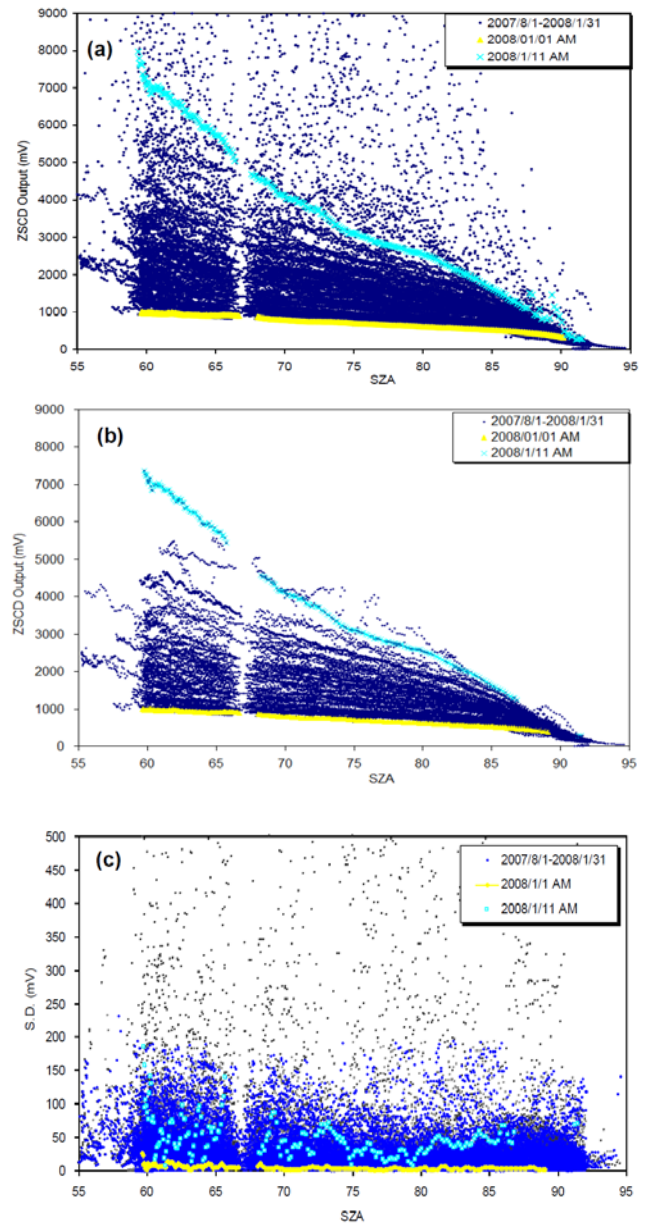


Fig. 10 Relation between ZSCD output result and solar zenith angle (from August 1, 2007 to January 31, 2008). (a) ZSCD output result shows at one-minute intervals including zenith passage of the clouds. The lowest solid line indicates the minimum atmosphere turbidity coefficient. (b) Highly scattered outputs of ZSCD are removed using the standard deviation. The upper line indicates the large result of maximum atmosphere turbidity coefficient without clouds at zenith. (c) ZSCD output result is a moving standard deviation in each five-minute interval.

る。また、最下端(黄色の実線)は、天頂に雲がなく大気の透明度が最も良好な条件で得た2008年1月1日の測定結果を示す。出力結果は雲による散乱光で大きく変化し、ほぼ全ての太陽天頂角でばらつきを持っていることが分かる。天

頂雲検出器の出力結果に含まれる雲の有無を判別するため、標準偏差(SD)を利用して一つの評価を試みた。

- (1) 反転観測の測定時間帯(太陽天頂角 $60^\circ \sim 90^\circ$)に得られる毎分値から5分間移動平均とSDを計算する。
- (2) 雲のあり／なしの評価は(1)のSD値に対して任意の閾値を設定しこの値を超える場合は雲ありとしてその時刻の出力結果を取り除く処理を行う。
- (3) 一連のデータセットについて(1)から(2)の計算処理をSDの閾値を変化させて3回繰り返し逐次近似する手法で処理する。

この最終処理の結果は、Fig.10(b)で示すように雲の影響がほぼ取り除かれた出力結果で現される。出力結果の最も大きい2008年1月11日午前(水色の実線)の場合は、出力結果から天頂に雲がないことが確認された良好な条件下でオゾン鉛直分布が計算された例である。その出力結果は太陽天頂角が小さいほど天頂雲検出器の出力が高い関係で表される。1分値の5分間のSDの移動平均と太陽天頂角の関係をFig.10(c)に示す。これらの結果からSDの閾値設定は、1回目を200mV、2回目と3回目を100mVとした。SDは大気の透明度が最も良い2008年1月1日(黄色)に最小となり、2008年1月11日の測定結果(水色)は約50mVのやや大きなばらつきで太陽天頂角に依存しない。

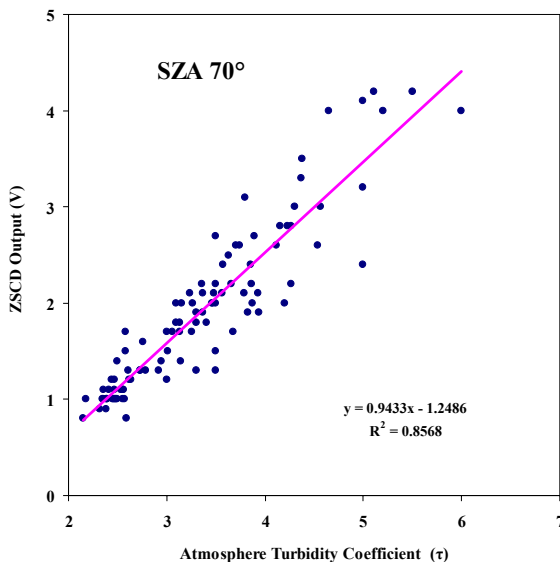


Fig. 11 Relation between the atmosphere turbidity coefficient at a solar zenith angle of 70 degrees and ZSCD output.

3.4 大気混濁係数との関係

つくばでは定常的に直達日射計による大気混濁係数の観測を行っている。大気混濁係数は大気指標である濁り具合(エアロゾルと水蒸気の光学的厚さ)を定量的に表すことができる。なお、大気混濁係数の解説および観測に関しては、気象庁(2007)の報告を参照いただきたい。

天頂雲検出器の出力は、天頂に雲のない晴天もしくは雲の影響を取り除いた後であっても事例によって大きく変化している(Fig.10b)。これは既に述べたようにエアロゾルの影響が大きいと考えられるので、大気の透明度と天頂雲検出器の出力結果の定量的な把握を行うため、大気混濁係数と天頂雲検出器の出力結果との関係を解析した。

Fig.11は一例として太陽天頂角 70° における大気混濁係数と天頂雲検出器の出力結果の散佈図を示す。2007年9月1日から2008年1月31日までの5ヶ月間において、天頂に雲がない晴天時のみの結果である。これにより大気混濁係数(τ)と天頂雲検出器の出力(ZSCD)には明瞭な比例関係があることが分かった。太陽天頂角(SZA)をZとした場合の天頂雲検出器の出力結果ZSCDと大気混濁係数 τ の関係は、次式で表される。

$$\text{ZSCD}(Z; \tau) = \alpha_z \cdot \tau + \beta_z \quad (4)$$

ここで、 α (傾き)と β (切片)は最小二乗法を用いて決定される。この式で α は大気混濁係数の指標となるパラメータであり、2.2のフォトアンプの倍率調整によって決定される。太陽天頂角 70° の場合、 α は0.943で、 β は-1.249である。

また、天頂雲検出器の出力結果と大気混濁係数は太陽天頂角に対してほぼ逆比例の関係を示す。太陽天頂角(大気路程;m)と天頂雲検出器の出力結果ZSCDの関係は、(5)式で表される。

$$\text{ZSCD}(\tau; m) = \alpha_\tau \cdot m + \beta_\tau \quad (5)$$

太陽天頂角 70° における代表の大気混濁係数から得られる大気混濁係数の傾き α は、大気混濁係数 $\tau=2$ の場合 α が-0.010、 $\tau=4$ の場合 α は-0.083の傾きである。太陽天頂角が大きいと天頂雲検出器の出力結果がより低い関係で現され、更に τ が小さい場合には天頂雲検出器の出力結果がより小さくなる。

一方、このような関係は逆に天頂雲検出器の出力結果によって大気混濁係数を推定することも可能になる。太陽天頂角 70° の天頂雲検出器の出力結果から推定される大気混濁係数 τ との関係は、(6)式で表される。

Table 1 Relation between ZSCD at each solar zenith angle and atmosphere turbidity coefficient. Values represent the output voltage for ZSCD.

SZA (deg)	m	$\tau=2$	$\tau=3$ (volt)	$\tau=4$	$\tau=5$
60	1.99	0.793	2.024	3.254	4.484
65	2.36	0.742	1.792	2.841	3.890
70	2.91	0.691	1.560	2.428	3.300
75	3.82	0.641	1.328	2.015	2.703
80	5.61	0.590	1.096	1.603	2.109
85	10.24	0.539	0.864	1.190	1.515
90	39.70	0.488	0.632	0.777	0.921

$$\tau = \text{ZSCD}_{70} \cdot 1.06 + 1.25 \quad (6)$$

この式から、天頂雲検出器の出力結果を基に観測時の大気状態(大気混濁度)を推定することができる。前述の2008年1月1日の天頂雲検出器の出力結果が全期間で最小であったが、その太陽天頂角70°での大気混濁係数は2.15で最低であった。太陽天頂角毎の各大気混濁係数における天頂雲検出器の出力結果の関係をTable 1に示す。

4. まとめ

反転観測の測定精度は雲の状態に依存するため、それを正確に把握し評価することは重要である。天頂雲の状態を検出し、反転観測の即時的な品質管理を行うため、天頂雲検出器を2007年7月から気象庁のオゾン観測網へ導入を開始した。天頂雲検出器の性能は、正確な測定波長の選択と正確な測定視野角に依存する。反転観測の自動化システムでは、1分毎の天頂雲検出器の出力電圧と反転観測の紫外線強度比が取り込まれる。天頂雲検出器は、ドブソン分光計の測定強度比と完全に独立して雲検出の情報を得られるのが特徴である。正確な測定波長の選択には赤外線領域の干渉フィルターを使用して、天頂雲による散乱のみを検出することができる。反転観測の測定N値の雲による影響評価は、天頂雲検出器の毎分値の時系列から標準偏差を利用して行う判別手法が即時的な品質管理に有効であることが分かった。

Photo.1はドブソン分光計の天頂光観測フード近傍に設置した天頂雲検出器である。ドブソン自動化システムでは、天頂雲検出器による雲検出の情報を新たな測定N値の品質管理手法として取り入れ、最適なアルゴリズム開発を行うことで今後の高品質なオゾン鉛直分布の提供に貢献することが期待できる。

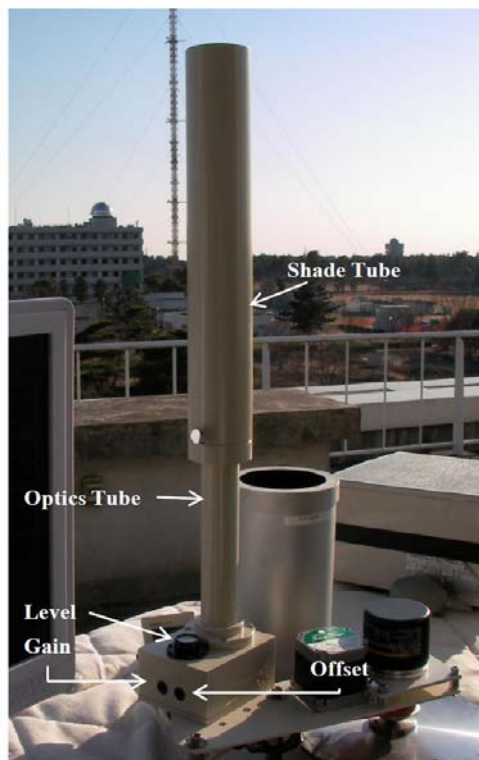


Photo. 1 Photograph of ZSCD installed on the center of Dobson spectrophotometer. The output signal is acquired through the A/D interface of the Dobson automated system.

謝 辞

本装置の導入に際しては、NOAAのRobert Evans氏に様々な技術情報をご教示頂いた。気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付オゾン層情報センターの江崎雄治オゾン層観測係長には、構成機器の調達や調整及び技術的支援を頂いた。また、高層気象台の松原廣司台長、観測第三課の廣瀬保雄課長、査読者並びに阿部豊雄編集委員長に種々のご助言やご教示を頂きました。あわせてお礼申し上げます。

引用文献

- Guerrieri, J. R. (1985) : Zenith Sky Cloud Detector. *Department of Electrical Engineering, Colorado State University Fort Collins*, 1 - 35.
- 廣瀬保雄・下道正則(1996) : 日射計. 気象研究ノート, **185**, 73 - 104.
- 気象庁(2007) : エーロゾル及び大気混濁度. 大気・海洋環境観測報告, 第 8 号(2006 年観測成果) (CD-ROM).
- 宮川幸治(2007) : ドブソン分光光度計の自動化ウィンドウズシステムの高度化—コンパクト PCI 制御方法への移行—. 高層気象台彙報, **67**, 85 - 98.