

# 反転観測におけるN値の再評価

宮川 幸治\*

## Re-evaluation of N-value from Umkehr Observation

Koji MIYAGAWA

### 要旨

ドブソンオゾン分光光度計を用いたオゾン反転観測では、様々な原因により測定 N 値に含まれるシフトの存在が指摘されている(Reinsel : 2002). このシフトの時期は、測器較正や測器交換に関係しており、長期データを再評価する試みが行われている(Petropavlovskikh *et al.* : 2000a, 2001, 2004, Miyagawa and Hirose : 2004). シフトは測器毎に太陽天頂角に依存する関係を含んでおり、その評価には測器同士の比較観測が重要であると考えられている. 長期データに含まれるシフト誤差は、気象庁のオゾン観測ネットワークが構築された 1957 年~1980 年後半の期間で特に多く含まれており、最大で約 21 N のシフト誤差が見積もられる. また、測器比較による太陽天頂角(SZA)への依存性は  $SZA > 80^\circ$  で大きく、最大 4 N である. オゾン鉛直分布の計算においては、器械定数と大気外定数を除くために  $SZA 60^\circ$  (または  $SZA \leq 70^\circ$ ) における N 値との差  $N(SZA) - N(60)$  を用いる. しかし、必ずしもこの標準的な手順により変動要因の多くがキャンセルされるわけではない. 例えばシフトが 2 N を超えると全ての高度におけるオゾン量が影響を受け、更に太陽天頂角の依存性を伴うことで最大 20% 前後の誤差が見積もられる. 各層のオゾン鉛直分布や長期トレンドの解析においては、誤差要因の解明と共に適正な評価が不可欠である. 本稿では、札幌、つくば、鹿児島、那覇の 4 地点について、測器交換(測器較正を含む)に伴うシフト誤差と反転比較の結果に基づいた太陽天頂角への依存性を評価することにより、過去の長期データセットに対して補正を行うと共にオゾン鉛直分布を再計算した. その結果、若干問題の残る時期はあるものの、概ね各地点の測器の交換時期に対応した不連続な段差を改善できたと考えられる.

### 1. はじめに

オゾン鉛直分布の正確な把握は、長期トレンドの監視等、オゾン研究において重要である. ドブソンオゾン分光光度計(以下、ドブソン分光計と記す)によるオゾン反転観測(以下、反転観測と記す)は長い歴史を持ち、その測定結果は、定常的な観測により提供される有益なオゾン鉛直分布データとして、多くの研究に利用されている. 欧州委員会及び世界気象機関(WMO)の REVUE (REconstruction of Vertical ozone distributions from Umkehr Estimates)プロジェクトは、ドブソン分光計の反転観測の役割と成果について評価を行うことを目的として、評価方法の開発と再評価を行っている. REVUE では長期データセットの品質を再考し、定常的に行われている世界 16 地点(札幌、つくば、鹿児島、那覇を含む)からの情報を分析し再評価するための提案を行った. このプロジェクト

により、40 年以上にわたるデータの連続性を保つための様々な問題が分析され、その結果が報告されている.

Miyagawa and Hirose (2004)は、長期にわたるつくばの反転観測データに含まれるオゾン全量依存性を議論し再評価した. 一方、オゾン鉛直分布を計算する現在の 1992 年版アルゴリズム Version 4 (UMK92 版)は、オゾン全量に依存する仮定 16 層のモデルを用いているが、Petropavlovskikh *et al.*(2000b), Bojkov *et al.*(2002), Kosmidis *et al.*(2000)等によって、各層の緯度による季節依存性のアップデートや Forward model の改訂された Version 8 (UMK04 版)への移行が検討され、研究者への提供が行われている.

オゾン全量の精度維持に関しては、1970 年代後半から世界準器(No.83)を基準とした較正体制が確立されている. アジア地区準器(No.116)は 1977 年以降定期的な較正が世界準器(No.83)によって行われており、No.116 を基準として更に国内及びアジア地区内の現用測器の較正が実施されている(Evans *et al.* : 2004, 宮川 : 2005). オゾン層回復

\*高層気象台 観測第三課

予測モデルの検証のためには、オゾン全量と共に反転観測の良質なデータがより一層求められている。気象庁のドブソン分光計による反転観測は、オゾン全量観測と共に国際地球観測年(IGY)の1957年からつくば(館野),札幌,鹿児島で、1974年から那覇で開始しており、衛星観測の検証の上でも重要な役割を果たしている。

## 2. 反転法

ドブソン分光計を用いた反転観測は、1920年代後半 Götz により発見された反転効果(Götz *et al.*: 1934)に基づいており、インバージョン法によりオゾン鉛直分布の導出方法が考案されて以降、世界のオゾン観測ネットワークで行われている。気象庁では1957年から現在まで、定常的な反転観測が継続されている。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。自動化されたドブソン分光計では、C波長組の他にA, D波長組を加えた3波長組による測定が可能となる。なお、極域のように太陽高度が低くなる地域では、SZA 80°~89°の区間をA, C, D各波長組について連続測定する Short 反転法が利用される。連続測定により、14点の指定のSZA(60, 65, 70, 74, 75, 77, 80, 83, 84, 85, 86.5, 88, 89, 90°)における観測点R値が得られる。観測点R値は、予め検定・校正された指数関数的な変換テーブルによって強度比のN単位(以下、N値と記す)に換算される。天頂からの散乱光で測定されるN値は、Mateer and DeLuisi(1992)の次式に基づいて計算される。

$$N(x,z)=100 \log_{10}\{[I(x,z,L2)/F0(L2)]/[I(x,z,L1)/F0(L1)]\}+k0 \quad (1)$$

ここでC波長組の場合、 $I(x,z,L1)$ は311.5nmの放射強度、 $I(x,z,L2)$ は332.4nmの放射強度、 $x$ はオゾンプロファイルを意味する。 $z$ は太陽天頂角(SZAに同じ、以下同様)、 $F0$ は大気外定数、 $k0$ は器械定数を表す。

現在の反転インバージョンアルゴリズム(Mateer and DeLuisi: 1992)は、1964年のオリジナルから最初に更新を行った Rodgers (1990)の手法に基づいたものである。測定された観測点のN値は、Version 4 (UMK92版)の解析プログラムを利用して計算され、地上から大気上端まで10層のオゾン量が求められる。

Table 1 Data number of C-Umkehr observation at Japanese Dobson station.

No.	Station	Lat/Lon	Term	Num. of Data
012	Sapporo	43.05/141.33	1958-2005	1748
014	Tsukuba	36.05/140.10	1957-2005	7568
007	Kagoshima	31.60/130.60	1958-2005/3	2304
190	Naha	26.21/127.69	1974-2005	1266

カナダの世界オゾン紫外線データセンター(WOUDC)には、世界のドブソン分光計のオゾン観測地点で得られた反転観測データのN値と計算された各層のオゾン量が保存されている。これらのデータを利用する際は、様々な測定上の問題や解析アルゴリズムに注意する必要がある。

長期データには、測器の交換に伴う器械定数 $k0$ の変化、測器の校正に伴うN値の変化、測器の検定常数、光学系の調整とその状態の変化、観測の読み取り誤差、読み取り補正の誤差、対流圏でのエアロゾルや雲(目視で判断しにくい薄い絹雲等)、水蒸気などの影響、更に火山噴火に伴う成層圏エアロゾルの影響、オゾン鉛直分布の解析アルゴリズムなど、種々の誤差要因が含まれていることが想定される。従って、特にオゾンの長期トレンド解析では、その評価を適正に行うことが不可欠である。

## 3. 利用データ

ここでは、気象庁がつくば(館野),札幌,鹿児島,那覇で反転観測を開始した1957年(那覇は1974年)以降2005年12月(鹿児島は2005年3月)までの観測データを利用した。これらの観測データは、WOUDCに定期的に報告されており、同ホームページで公表されウェブサイトからダウンロードも可能である。つくばでは、自動化されたドブソン分光計を利用して2004年7月からLong反転法のC波長組に加えてA, D波長組の測定を開始しており、3波長組の貴重なデータベースが蓄積されつつある。今回の解析では、Long反転法によるC波長組のデータを利用した。Table 1に地点毎の地点情報と利用データ数を示す。これらの長期データで何らかの原因で明らかに誤りと判断されるデータは削除した。つくばの反転観測データは、世界のオゾン観測地点の中でもスイスのアローサ、米国ボールダーと並ぶ1950年代からの長期データを保有し、その数は7千個以上にのぼりオゾン鉛直分布の解析的研究のための重要な役割を果たしている。

オゾン鉛直分布の計算では、測定された14点の指定のSZAのうち12点(60, 65, 70, 74, 77, 80, 83, 85, 86.5, 88, 89,

Table 2 Chronology of Dobson used for Umkehr observation at each station.

Station Name	Commence date , Dobson No.
Sapporo	1958/1 5704 Shimazu
	1959/6 5706 Shimazu
	1961/10 5704 Shimazu
	1964/12 5705 Shimazu
	1968/11 5704 Shimazu
	1976/3 5702 Shimazu
	1982/1 5703 Shimazu
	1985/2 5704 Shimazu
	1989/6 128 Beck
	1994/9 129 Beck automated
	1998/5/12 126 Beck automated Continued to date
Tsukuba/Tateno	1957/8 52 Beck
	1959/3 5706 Shimazu
	1959/4 52 Beck
	1976/1 116 Beck
	1977/7 5601 Shimazu
	1979/1 116 Beck
	1984/10 5704 Shimazu
	1985/01 116 Beck
	1989/6 127 Beck
	1989/8 116 Beck
	1994/1 125 Beck automated Continued to date
	Kagoshima
1963/11 5706 Shimazu	
1970/1 5705 Shimazu	
1977/1 5704 Shimazu	
1984/1 5705 Shimazu	
1986/1 5703 Shimazu	
1989/12 127 Beck	
1995/10 128 Beck automated (Finished in 2005/3/31)	
Naha	1974/4 5703 Shimazu
	1983/1 5706 Shimazu
	1987/1 5705 Shimazu
	1988/11 129 Beck
	1994/3 126 Beck automated
	1996/10/4 127 Beck automated Continued to date

90°)が利用される。この書式変換は、オゾン鉛直分布計算の前処理プログラム(decode.exe)による平滑化の点検で実行される。本稿の解析では、これら12点のSZAにおけるN値を利用した。

#### 4. 測器の変遷

オゾン観測ネットワークを持つわが国は、複数の測器を整備して精度維持に努めている。定期的なオゾン観測を継続するため、数年毎につくばで較正と保守点検を行った測器を現地に送り、それまで観測に使用してきた測器と交換する方法で観測体制を維持してきた。しかし最近10年間は、定期保守と較正を現地で実施し同一の測器を継続して使用する方法へと移行した。各地点では、過去約50年間で1地点当たり6台～8台の測器が使われている。また、ドブソン分光計の種類は、英国のBeck製(Ealing社)と日本の島津製(島津製作所)が利用され、Beck製7台、島津製6台がこれまで日本のオゾン観測地点で利用された。島津製のドブソンは、Beck製と比較し個々の特性と安定性が若干劣るとされ、測器較正に多くの時間が費やされていたが、鹿児島での1989年11月を最後にそれ以降全ての地点でBeck製に移行した。自動化による観測は、つくばの1994年を最初に札幌、鹿児島、那覇の各地点に導入され、人為誤差の含まない統一した観測が行われると共に、特に反転観測で飛躍的に操作性の向上と測定誤差の低減がはかられた(Miyagawa: 1996, 2004)。札幌、鹿児島、那覇の観測は午後に限られていたが、自動化導入に伴い午前午後の一泊2回の観測となり、より多くデータ取得が可能になった。それ以降、13年以上の安定した観測とデータ蓄積が継続されている。Table 2は、各オゾン観測地点で反転観測に利用された測器の変遷一覧を示す。

#### 5. 測定N値の結果

オゾン観測4地点で測定されたN値のデータからは、雲の影響や明らかな誤観測などは取り除かれている。しかしながら、長期データには、測器の交換毎に光学くさびの検定、光学系の調整、および較正に伴うと考えられるN値のシフト(不連続な段差)が多く含まれている。これらの検出のため、N値とオゾン全量の直線的な関係に基づいて簡易的にシフトの影響を確認することが提案されている(Bojkov et al.: 2002)。このようなN値とオゾン全量の関係は、SZA 60°～80°の範囲で解析が可能である。

オゾンの鉛直分布を計算するプログラムでは、大気外定数や器械定数の変動の影響を取り除くために、SZA 60°(または測定に利用可能なSZAが70°以下)における反転観測のN値(N(60)と表す)を引き算する標準的な手順で処理される。しかし、基準となるN(60)がN値で2N(NはN単位の値を表す)を超えるとオゾン鉛直分布の誤差となって現れる。オゾン全量(TOZと表す)とN(60)の比N(60)/TOZで表した場合、2Nはオゾン全量300m atm-cm

で約 0.007 となる。

国内 4 地点の長期データについて, Kosmidis *et al.* (2000) は, 測定 N 値(測定されたままのオリジナルの N 値)の様々な解析を行いシフトの存在を指摘している。長期データの測定 N 値は N(60)/TOZ を時系列に表すことによりその特異な変化を検出できる。Fig.1 (左)は, 札幌, つくば, 鹿児島, 那覇の各地点における観測開始から 2005 年までの N(60)/TOZ の時系列を示す。この結果から各地点共にシフトのあることが明瞭に見て取れる。これらの主なシフトは, Table 2 で示した測器の交換時期と符合している。図の横線は, 交換時期に挟まれたその測器の使用期間での平均値を表す。全体的にシフトは観測を開始してから 1980 年代までが特に大きく, 1990 年以降は各地点共に 0.156 (N(60)/TOZ)前後で推移している。以下, シフトを示す数値は N(60)/TOZ である。

**一札幌一** 全期間で最もシフトが大きい時期は, 島津製の No.5702, No.5703 が利用された 1976 年 3 月から 1985 年 1 月の期間の 0.125 で, 1989 年 6 月以降の Beck 製の平均値 0.159 と比較し 0.034 (10.2N に相当)低い値となる。また, 島津製のドブソン分光計が使われた時期は, Beck 製に比べてばらつきと季節変動幅も大きい。

**一つくば/館野一** つくばでは, 観測開始から現在まで主に Beck 製のドブソン分光計が利用された。しかし, 測器の交換, 較正に伴う大きなシフトが 1985 年を境に明瞭に表れている。1977 年 7 月から 1984 年 12 月まで島津製と Beck 製による No.5601, No.116, No.5704 のドブソン分光計が利用された。この期間の平均値 0.111 が最も低く, 1985 年から 2005 年までの平均値 0.156 と比較し 0.045 (13.5N に相当)低い値を示す。測器の変更を伴わない場合の 1959 年から 1963 年までは, 年々のシフトが僅かに残っている。観測開始時の 1957 年から 1984 年の期間は, 最近の平均値である 0.157 を全ての季節で下回る値となっている。1984 年以前のこれらのシフトについては, 1984 年秋にドブソン国際比較に参加した際に指摘された。この原因は測器の光学的な問題であることが分かっており, その後改善されている。

**一鹿児島一** 鹿児島では, 1989 年 12 月以降 Beck 製のドブソン分光計が利用された。全期間で最もシフトが大きい時期は, 島津製の No.5705, No.5704 が利用された 1970 年 1 月から 1985 年 12 月の期間の 0.106 で, 1989 年 12 月以降の Beck 製の平均値 0.154 と比較し 0.038 (11.4N に相当)低い値となる。また, 島津製のドブソン分光計が利用された期間は, 季節的なバラツキや変動が札幌などと比較しても大きいことが見て取れる。また, 年々の不連続なシフト傾向が 1960 年前後と 1973 年前後で見られる。

**一那覇一** 那覇の N(60)/TOZ の時系列では, 1987 年を境として大きなシフトがある。観測開始の 1974 年から 1986 年 12 月までのシフトが大きい時期の平均値 0.101 は, 1988 年 11 月以降の Beck 製の平均値 0.149 と比較し 0.048 (14.4N に相当)低い値となる。Beck 製のドブソン分光計は, 1988 年 11 月以降 3 台の測器が利用された。

以上の通り, 4 地点における Beck 製のドブソン分光計の場合は, 高緯度ほど N(60)/TOZ の平均値が大きく, 札幌から那覇までのそれぞれの値は, 0.159, 0.156, 0.154, 0.149 であった。これは後の再評価で説明するようにオゾン全量依存性に関係した値で, 適正なレベル値を反映しているものと考えられる。

## 6. 測定 N 値の再評価

再評価については, Miyagawa and Hirose (2004)によってつくばにおける解析結果が報告されている。本稿では, 同様の手法を札幌と鹿児島, 那覇へ適用したが, SZA への依存性を全ての測器について見積もることは出来なかった。

### 6.1 シフト補正

測定 N 値による N(60)/TOZ の時系列ではシフトが検出されたが, これらの不規則なシフトを測器交換の時期にあわせて補正することが必要である。地点毎の N(60)/TOZ の基準レベルを決定する際, その時期は 1994 年以降の Beck 製に移行した最近の測器利用期間とした。補正期間  $t$  における測定 N 値に対するシフト補正  $\Delta N_s(t)$  を, 以下により算出した。

$$\Delta N_s(t) = [NPO_{ref} - NPO(t)] \cdot TOZ_{ref} \quad (2)$$

$$N'(x, z, t) = N(x, z, t) + \Delta N_s(t) \quad (3)$$

ここで,  $NPO_{ref}$  は, SZA 60°における N 値とオゾン全量の比 N(60)/TOZ の基準となる平均レベル,  $NPO(t)$  は補正期間  $t$  における N(60)/TOZ の平均値である。TOZ<sub>ref</sub> は基準となるオゾン全量の平均値を表す。この補正值  $\Delta N_s(t)$  は, 対象の補正期間毎に全ての SZA における測定 N 値の (1)式に加算され,  $N'(x, z, t)$  が補正済み値となる。各地点の使用測器毎の測定 N 値に対するシフト補正值を Table 3 に示す。補正後の N(60)/TOZ を Fig.1 (右)に示す。補正後の結果は, 4 地点で概ねシフトが解消されたことを示す。しかし, 鹿児島の観測開始から 1976 年の期間は, シフト補正で解消できない不連続な傾向が依然残っている。

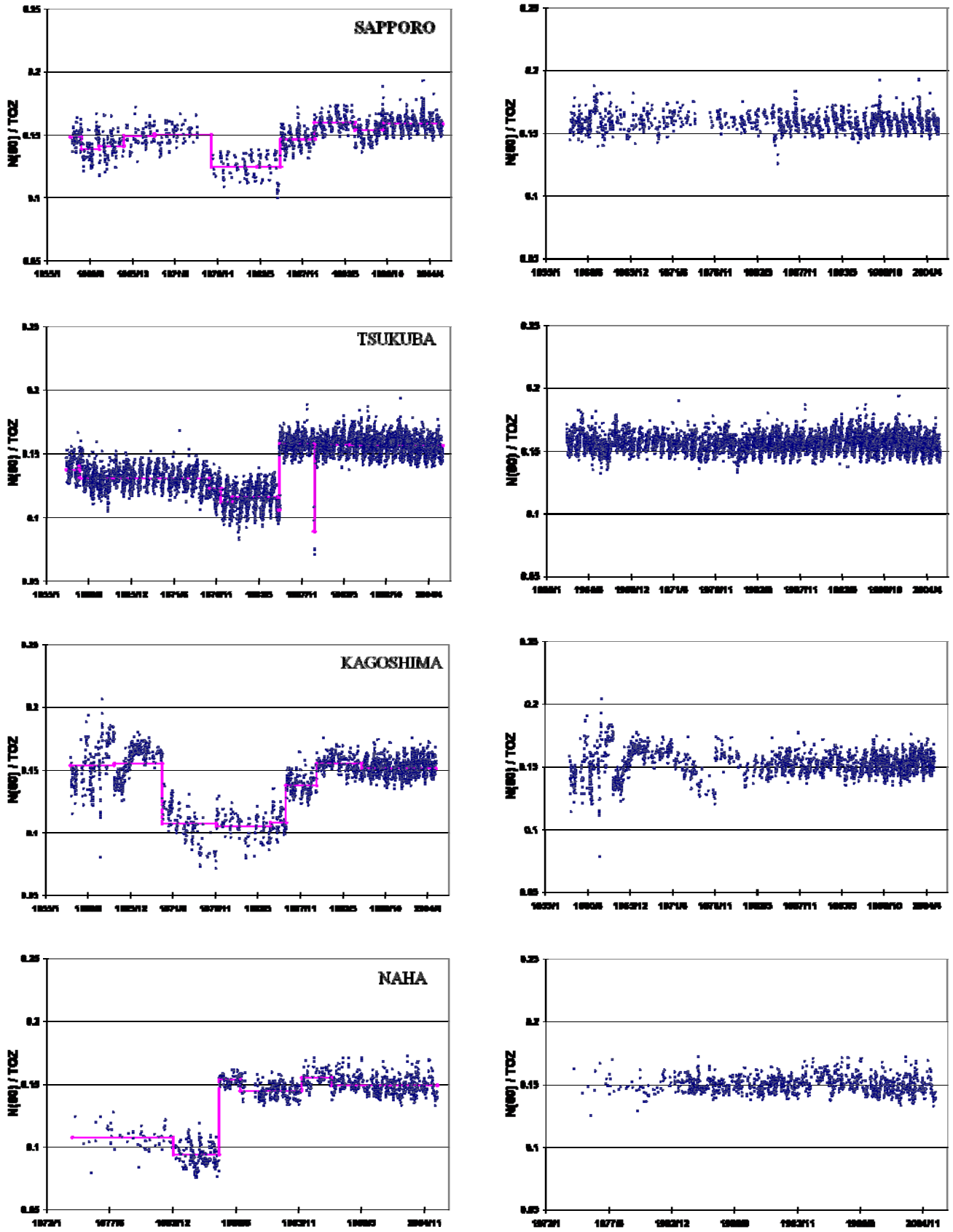


Fig. 1 Ratio of the N-value at SZA 60° to the total ozone (TOZ) for each Umkehr measurement at Sapporo, Tsukuba, Kagoshima and Naha, respectively (left: original, right: corrected).

Table 3 Shift N values and the terms at each station.

( $\Delta N_s$  with mark "\*" ( $>2N$ ) exerts significant influence on ozone vertical profile)

Sapporo Average Total ozone: 361 m atm-cm		
Term (t)	Dobson No.	$\Delta N_s$
1958/1 – 1959/5	5704	3.7 *
1959/6 – 1961/9	5706	7.2 *
1961/10 – 1964/11	5704	6.2 *
1964/12 – 1968/10	5705	3.4 *
1968/11 – 1976/2	5704	2.9 *
1976/3 – 1981/12	5702	12.0 *
1982/1 – 1985/1	5703	12.1 *
1985/2 – 1989/5	5704	4.3 *
1989/6 – 1994/8	128	-0.5
1994/9 – 1998/5/11	129	1.7
1998/5/12 – 2005/12	126	0.0
Tsukuba Average Total ozone: 313 m atm-cm		
Term (t)	Dobson No.	$\Delta N_s$
1957/8 – 1959/2	52	5.7 *
1959/3 – 1959/3	5706	4.8 *
1959/4 – 1975/12	52	7.9 *
1976/1 – 1977/6	116	10.4 *
1977/7 – 1978/12	5601	13.7 *
1979/1 – 1984/9	116	12.4 *
1984/10 – 1984/12	5704	15.7 *
1985/1 – 1989/5	116	-0.5
1989/6 – 1989/7	127	20.9 *
1989/8 – 1993/12	116	-0.2
1994/1 – 2005/12	125	0.0
Kagoshima Average Total ozone: 282 m atm-cm		
Term (t)	Dobson No.	$\Delta N_s$
1958/3 – 1963/10	5705	0.0
1963/11 – 1969/12	5706	-0.3
1970/1 – 1976/12	5705	13.1 *
1977/1 – 1983/12	5704	13.8 *
1984/1 – 1985/12	5705	12.9 *
1986/1 – 1989/11	5703	4.5 *
1989/12 – 1995/9	127	-0.4
1995/10 – 2005/3	128	0.0
Naha Average Total ozone: 265 m atm-cm		
Term (t)	Dobson No.	$\Delta N_s$
1974/4 – 1982/12	5703	11.0 *
1983/1 – 1986/12	5706	14.6 *
1987/1 – 1988/10	5705	-1.1
1988/11 – 1994/2	129	1.2
1994/3 – 1996/10/3	126	-1.7
1996/10/4 – 2005/12	127	0.0

## 6.2 太陽天頂角への依存性とその補正

測定範囲  $SAZ$   $60^\circ \sim 90^\circ$  の  $N$  値は、測定される  $SAZ$  に依存する系統的な誤差を持つことが知られている。複数の測器で同時に比較測定することにより、 $SAZ$  に依存した相互の系統的な差を検出することができる。この場合、基準となる測器を予め定めて個々の測器に対して差を見積もることが必要となる。反転観測の場合、基準となる測器や基準とすべき値が国際的に定められていないため、この解析では仮の基準器をアジア地区準器(No.116)と定めて、それとの直接比較または間接的な比較に基づいて差を見積もった。 $SAZ$  依存性の評価では、測器比較によって得られた多くのデータをもとに統計的手法を用いる。しかし過去の多くの測器は比較の実績が少なく、その評価が難しい場合が多い。特に島津製のドブソン分光計は、老朽化に伴い殆どの測器が廃棄されているなど、全ての測器について定量的な値を再現することが困難である。島津製のドブソン分光計には、過去に数回の比較事例があり、それらはデータ評価に役立つ貴重な情報となる(観測第三課：1984)。Beck製のドブソン分光計には、自動観測が可能になった1994年以降、 $SAZ$  依存性を評価するための多くの比較データがある。

—札幌— 過去8台の測器が利用されたが、島津製のNo.5702, No.5703, No.5704を除いて他5台の期間で見積りが可能である。Beck製のNo.125~No.129のドブソン分光計に関しては、札幌とつくばでの比較データによって各測器に概ね一致した $N$ 値の差の傾向があることが分かった。このため1989年6月以降使用したBeck製のNo.128, No.129, No.126の測器については、 $SAZ$  依存性の補正値を同様に評価した。島津製のNo.5705, No.5706は、つくばでのNo.116との比較結果に基づき評価した。

—つくば/館野— 島津製のNo.5601, No.5704を除く他の5台の測器は、反転比較データを用いて見積もることができた。Beck製のNo.52は、1974年にNo.116との2回の比較があり、更に1996年のアジア太平洋地域オゾン国際比較(IWOAP)で実施した1回の比較結果がある。3回の個々の比較結果は概ね一致しており、差の最も大きい $SAZ > 80^\circ$ で約1.5 $N$ である(No.52は1975年WMOへ譲渡された後現在フィリピンでのオゾン観測に利用されている)。Beck製のNo.125とNo.127(利用された期間2ヶ月)は、1998年以降にNo.116との直接比較を何度か実施している。これらの比較データによるBeck製のNo.116とNo.125との差は概ね一致した傾向があり、平均的な $SAZ > 86^\circ$ で約3 $N$ である。比較データを持たない島津製のNo.5601, No.5704は、今回の長期データの中で約2年間と短く $SAZ$  依存性の補正をなし(ゼロ)とした。

—鹿児島— つくばと同様に長期データを有する鹿児島のオゾン鉛直分布は、中低緯度における衛星観測の比較解析などに重要な役割を果たしている。島津製のドブソン分光計は、1958年から32年間にわたって使用され、以後Beck製へ移行した。島津製のNo.5705とNo.5706が観測に使われていた期間は、衛星観測によるオゾン鉛直分布の解析から異常なオゾンの変化が指摘されていた。1977年カナダ大気環境庁のMateer氏の指摘(観測第三課:1984)により、気象庁は高層気象台でのアジア地区準器(No.116)との直接比較を行い問題の検討がなされた。島津製のNo.5705とNo.5706のドブソン同士の反転比較は、定期的な測器較正のために那覇へ移動した際に3回行っている。島津製のNo.5705とNo.5706のN値の差のSZA依存性は、No.116を基準とした比較観測から推定されるが、両測器共概ね再現性があり、その系統的な差の最大は $SZA > 86^\circ$ において共に約2Nである。しかし、差の傾向は、No.5706の-2Nに対してNo.5705は+2Nであり傾向が全く反対である(Fig.2(下))。この両測器間の交換によって、 $SZA > 89^\circ$ において最大4Nの差が生じ、各層のオゾン量に大きな誤差を生じる。

—那覇— 那覇では島津製のNo.5703が利用された1974年から1982年を除いて1983年以降のSZA依存性を見積もることができる。Beck製のNo.129, No.126, No.127については、No.125との比較結果に基づいたSZA依存性を見積もった。島津製のNo.5705, No.5706の期間は、那覇での両測器の比較データに基づきNo.116を基準とした比較観測からSZA依存性を見積もり補正した。

太陽天頂角への依存性の補正值 $\Delta N_z(z, ins)$ は、SZA $60^\circ$ で標準化された基準測器 $ref\_ins$ と比較測器 $ins$ の測定N値の差で(4)式により算出される。ここで、基準測器 $ref\_ins$ はアジア地区準器(No.116)とする。No.116との直接比較を持たない比較測器の場合は、No.116との直接比較に基づいて決定された二次的な基準測器による。

$$\Delta N_z(z, ins) = \frac{\sum \{ [N(z, ins) - N(60, ins)] - [N(z, ref\_ins) - N(60, ref\_ins)] \}}{n} \quad (4)$$

$$N''(x, z, t, ins) = N'(x, z, t) + \Delta N_z(z, ins) \quad (5)$$

ここで、 $n$ は両測器の比較回数を表す。この補正值 $\Delta N_z(z, ins)$ は、対象の比較測器に対してSZA毎に(3)式の $N'(x, z, t)$ に加算され、 $N''(x, z, t, ins)$ が補正済み値となる。

### 6.3 オゾン全量への依存性とその補正

つくばでのアジア地区準器(No.116)とBeck製のNo.125

の反転比較観測では1998年から2004年まで32例を取得した。すでに述べた解析によって6.2項のSZA依存性を取り除いても除去されない残余誤差がある。この誤差はオゾン全量依存性として更に検出することができる。オゾン全量依存性については、Petropavlovskikh *et al.* (2004)による比較データの結果からも指摘されており、またMiyagawa and Hirose (2004)はこの定量的な評価について述べている。その主な原因としては、プリズムの材質や純度による内部散乱光の影響や、測器内部の迷光などが考えられている。つくばでのNo.116を基準としたNo.125の比較やその他の結果に基づく評価により、概ねBeck製のNo.125~No.129の測器で共通したオゾン全量依存性を持つことが判明しており、最近の多くの比較からも同様な結果が得られている。オゾン全量依存性が最も大きいSZA $83^\circ$ で、100 m atm-cmの変化に対して1.5Nである。

No.116とNo.125の比較により得られたオゾン全量への依存性をFig.3に示す。Fig.3(上)は、No.116とNo.125の

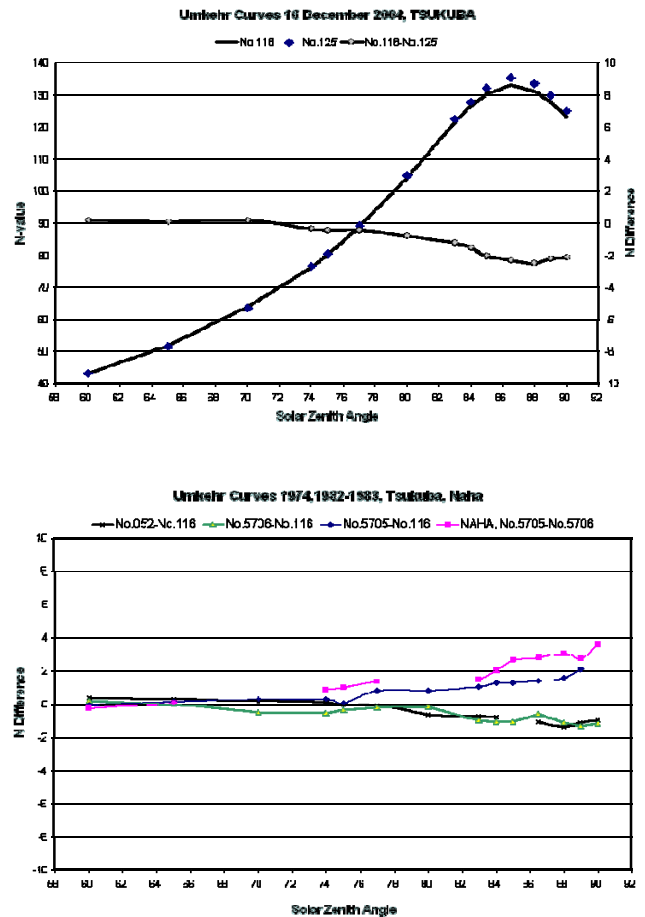


Fig. 2 Comparison results for N-value shift detection of Umkehr observation. Solar zenith angle (SZA) dependence at Tsukuba (top). Ditto for Shimazu Dobson at Tsukuba and Naha (bottom).

同時測定された N 値の差の平均(中心赤丸)とその標準偏差( $\pm 1\sigma$ )の範囲(黒の曲線)を示す。更に測定の N 値には、Fig.3 (下)で示すオゾン全量の依存性が含まれている。このオゾン全量依存性を個々の測定の N 値から取り除くことで Fig.3 (上)の赤の縦棒で示す範囲に改善される。オゾン全量依存性は、特に SZA 77°~90°の天頂散乱強度比が弱くなる SZA で大きく現れている。

オゾン全量依存性による補正值  $\Delta Nto(toz,z,ins)$ は、オゾン全量と太陽天頂角の(6)式の関係式により算出される。係数  $\alpha$ 、 $\beta$  は、SZA 60°で標準化された基準測器  $ref\_ins$  と

比較測器  $ins$  の測定 N 値の差をオゾン全量  $TOZ$  の一次式の関係で表したときの切片と傾きである。

$$\Delta Nto(toz,z,ins) = \alpha(z,ins) + TOZ \cdot \beta(z,ins) \quad (6)$$

$$N'''(x,z,t,ins,toz) = N''(x,z,t,ins) + \Delta Nto(toz,z,ins) \quad (7)$$

この補正值  $\Delta Nto(toz,z,ins)$ は、(5)式の  $N''(x,z,t,ins)$  に加算され、 $N'''(x,z,t,ins,toz)$  が補正済み値となる。

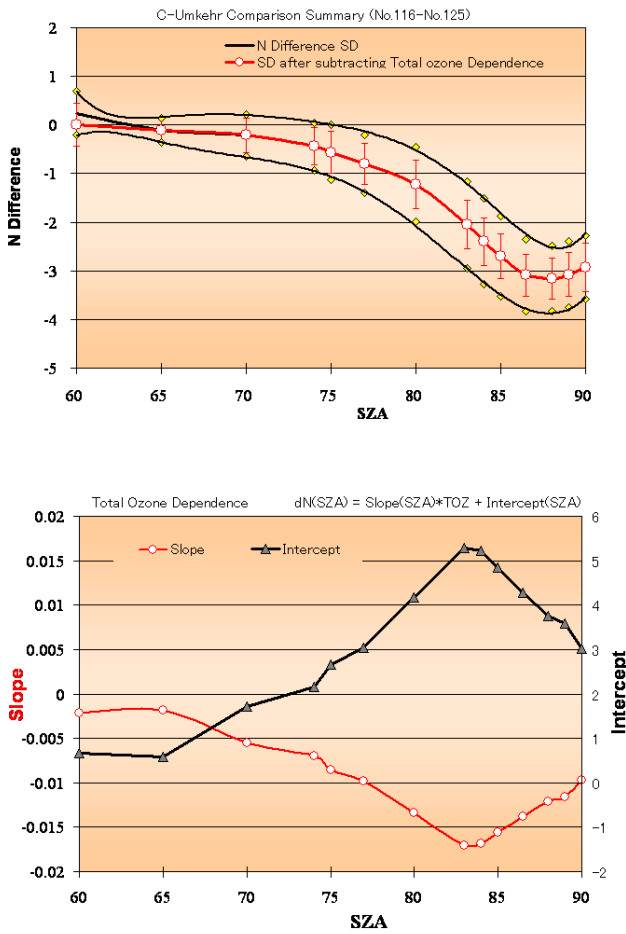


Fig. 3 Dependence of N-value difference on solar zenith angle (SZA) and total ozone (TOZ) by Umkehr comparison observation between No.116 and No.125. Top: N-value difference is normalized at SZA 60°. Black curves represent the standard deviation (SD) for original N-value difference. Red circle and vertical bar are the SZA dependence and standard deviation after subtracting the total ozone dependence. Bottom: Dependence of N-value difference on total ozone at each SZA.

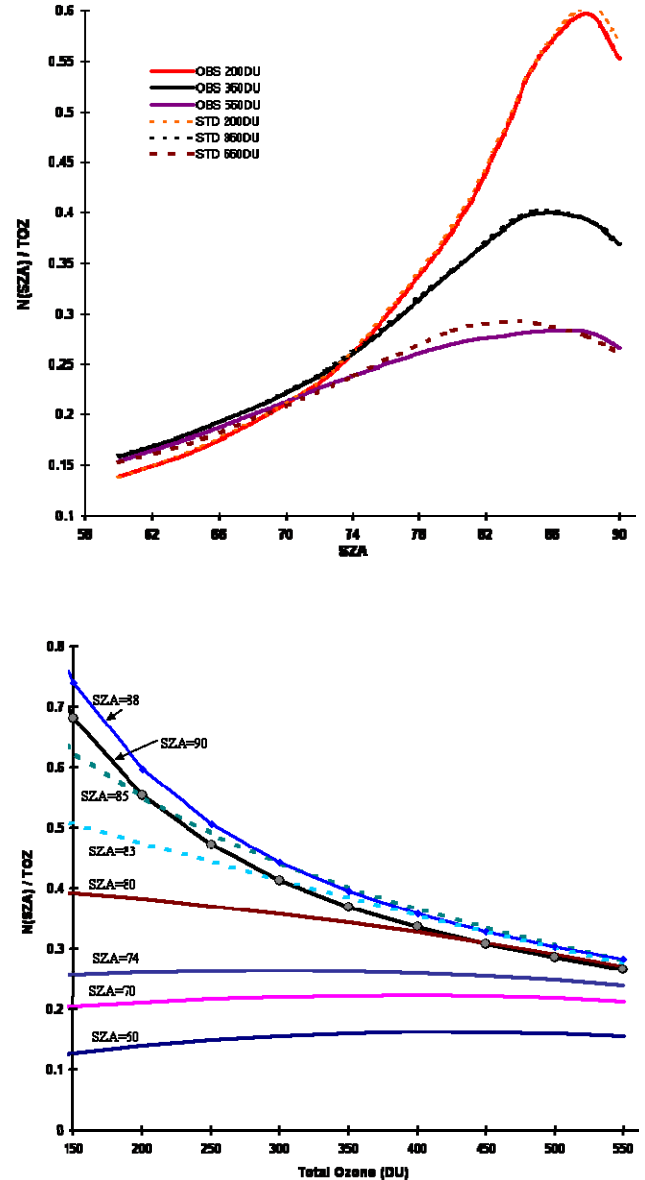


Fig. 4 Relation between the total ozone (TOZ) and N value after re-evaluation. Top: Standard N values and average of N values at Tsukuba. Bottom:  $N(SZA)/TOZ$  and total ozone for each solar zenith angle (SZA), average over four stations, i.e. Sapporo, Tsukuba, Kagoshima and Naha.

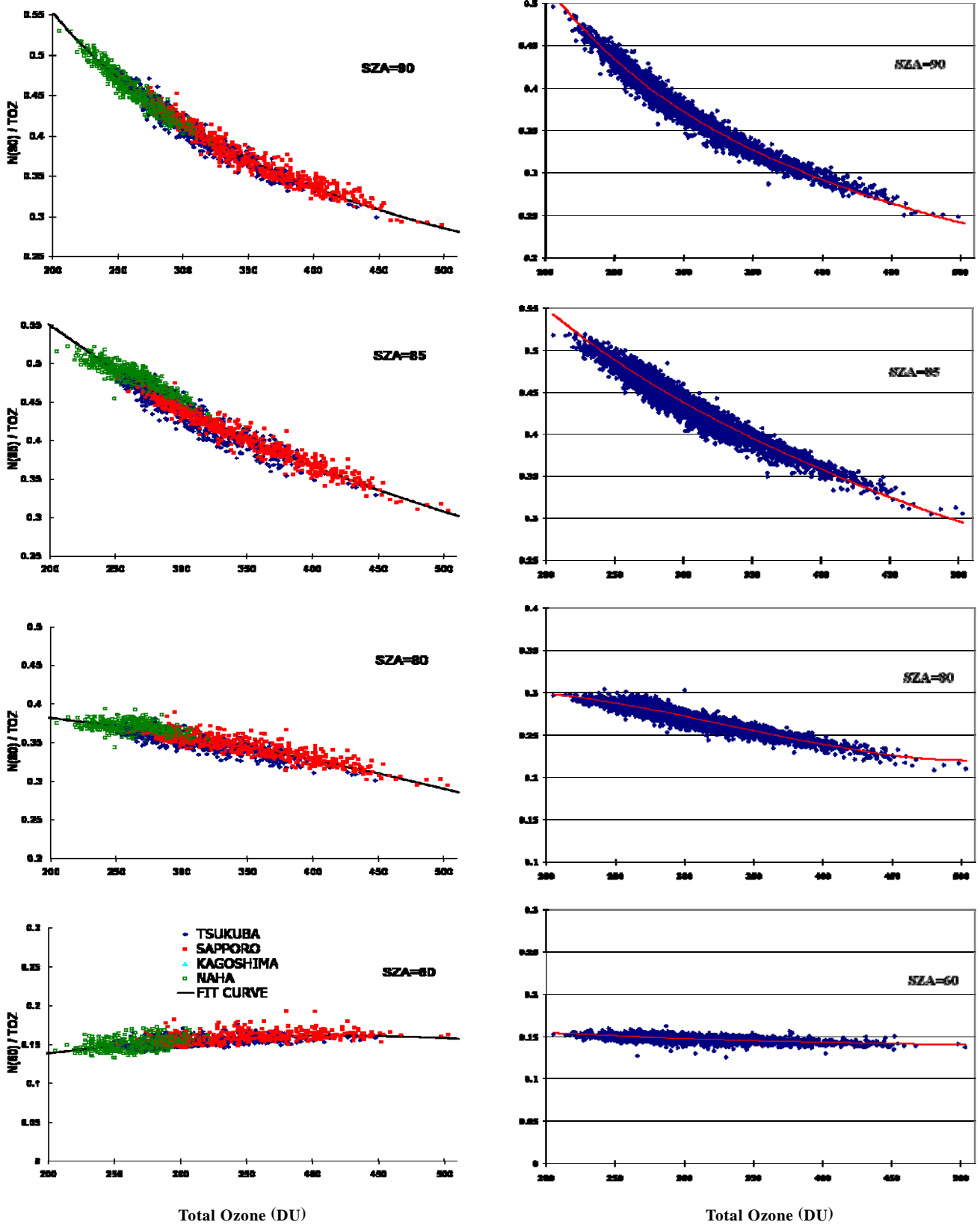


Fig. 5 Relation between  $N(SZA)/TOZ$  and total ozone for each solar zenith angle (SZA).  
 Left:  $N(SZA)/TOZ$  for each SZA. Right: Same as left but normalized by  $N(70)/TOZ$ .

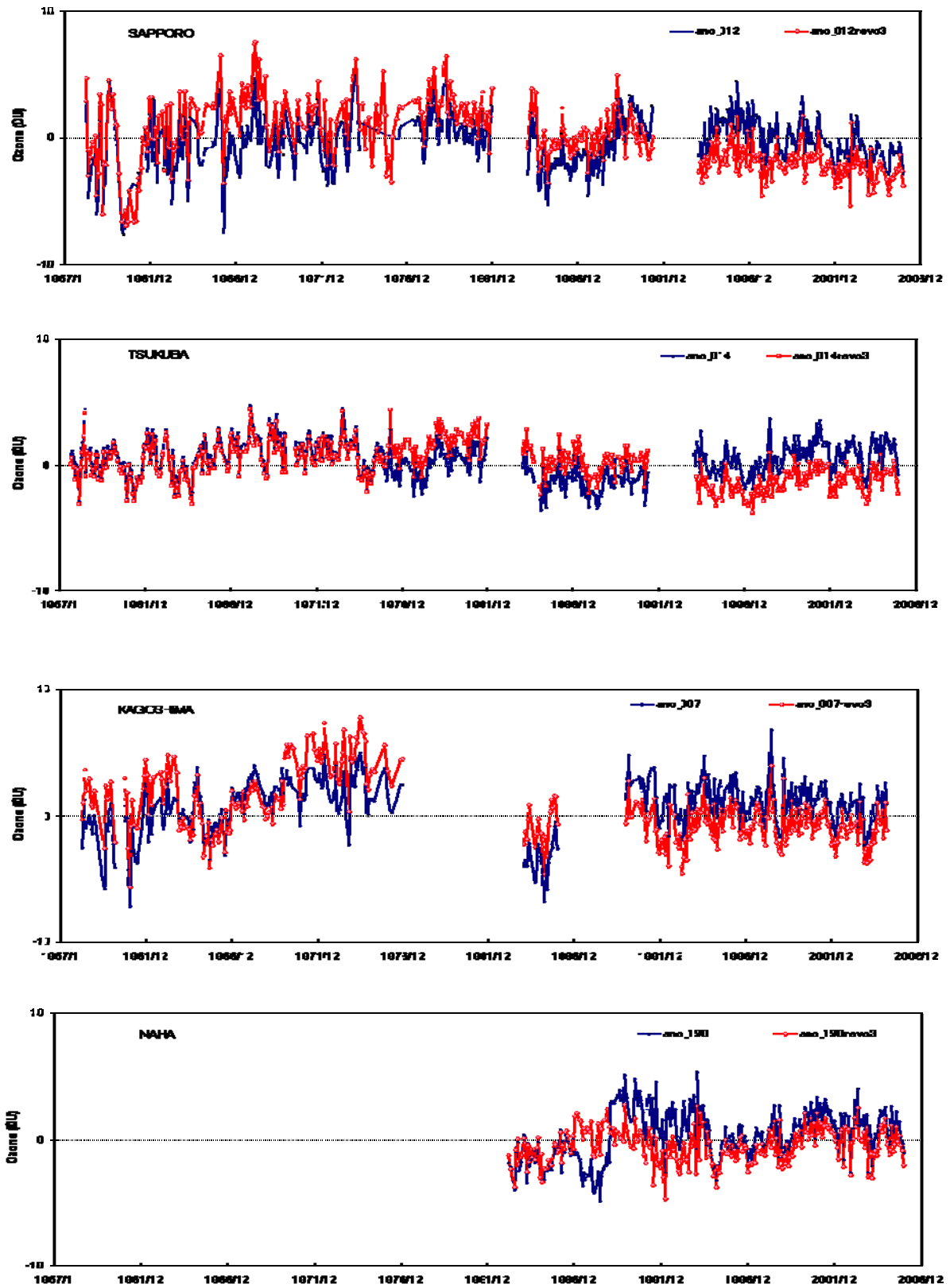


Fig. 6 Time series of corrected (red line) and uncorrected (blue line) ozone amount in the 7-th layer of Umkehr observation. (From top: Sapporo, Tsukuba, Kagoshima and Naha)

## 6.4 再評価後の平均 N 値と基準 N 値の関係

6.2, 6.3 項の解析では, 1994 年以降のデータに基づき補正のための関係式を導いた. ここで, 地点毎に決定した関係式が, 中緯度における標準的なオゾン鉛直分布を与えたときの基準となる N 値(基準 N 値)に対してどのような関係にあるか検討した. 基準 N 値は, 反転観測のアルゴリズムに利用されており, それらは 3 通りのオゾン全量(200, 350, 550DU)に対して SZA 毎にテーブルで与えられている. これらの基準 N 値を用いて, 中緯度帯に位置するつくばにおける再評価後の N 値を検証した結果, Fig.4 (上)の通りであった. 図中, OBS は再評価後の平均 N 値を, STD は基準 N 値を表す. 同図に示されるように, 再評価後の平均 N 値と標準的なオゾン鉛直分布に対する基準 N 値は補正前(図は省略)に比較してよく一致しており, 補正がより適正の範囲であることを示唆する. なお, オゾン全量が 550m atm-cm で両者の間にわずかな差が見られるのは, つくば上空でのオゾン全量がこれほど大きくなる頻度が少ないことによるデータのバラツキが反映されたものと考えられる.

Fig.4 (下)は, 再評価後の 4 地点の平均した  $N(\text{SZA})/\text{TOZ}$  と  $\text{TOZ}$  の関係を SZA 毎に示している. SZA  $60^\circ \sim 80^\circ$  付近までは, ほぼ直線的な関係にあると言える. SZA  $80^\circ \sim 90^\circ$  では, オゾン全量が小さく SZA が大きいほど傾きが大きくなる傾向を示す. この傾きの変化は, 主に多重散乱光による強度比の変化を反映している.

Fig.5 (左)に 1994 年から 2005 年までの再評価後の 4 地点(札幌, つくば, 鹿児島, 那覇)での  $N(\text{SZA})/\text{TOZ}$  とオゾン全量の関係を示す. 代表する SZA 60, 80, 85,  $90^\circ$  で見ると, 概ね各地点のオゾン全量に対する依存傾向が一致している. Fig.5 (右)は, SZA  $70^\circ$  を基準として示した SZA 依存性を示す. 札幌, 鹿児島, 那覇の平均基準値については, つくばの平均的な基準の値を利用し, その関係によって評価した. SZA  $60^\circ$  付近は, SZA  $70^\circ$  に比較して対流圏エアロゾルの影響を受けやすいことがある. これは測定する二波長の主たる散乱の場所がオゾン層の下端より低い高度で起こるため, 季節による特徴が見られることがある. オゾン鉛直分布の解析では, UMK92 版で SZA  $\leq 70^\circ$ , UMK04 版で SZA  $70^\circ$  によって計算される. Fig.5 のオゾン鉛直分布の計算に用いられる N 値としては, 左右比較で明らかのようにバラツキが対流圏でのエアロゾルの影響や器械定数が取り除かれた右図が小さく, UMK92 版より UMK04 版がより誤差を小さくする効果がある.

## 6.5 オゾン鉛直分布の再評価による結果

反転観測によるオゾン鉛直分布の計算では, 地上から

大気上端まで10層に分割したそれぞれの層(地上 $\sim 250$ ,  $250 \sim 125$ ,  $125 \sim 62.5$ ,  $62.5 \sim 31.2$ ,  $31.2 \sim 15.6$ ,  $15.6 \sim 7.8$ ,  $7.8 \sim 3.9$ ,  $3.9 \sim 1.96$ ,  $1.96 \sim 0.98$ ,  $0.98 \text{ hPa}$ )に含まれるオゾン量(DU)が得られる. 再評価前後のオゾン鉛直分布の比較では, Mateer and DeLuisi(1992)による現在の1992年版アルゴリズムVersion 4 (UMK92版)を用いた.

ここでは一例として, 観測開始から2005年までの札幌, つくば, 鹿児島, 那覇における第7層の月平均結果をFig.6に示す. 変動の大きい時期は, 月内の観測数が少ない期間に対応している. 各地点共に再評価によって, 1990年以降はオゾン量を減らす方向, 1990年以前は逆に増やす方向の補正となった.

那覇は, 1986年から1987年の島津製のNo.5706からNo.5705への移行時および1988年11月のBeck製へ移行時の段差が再評価によって解消された.

## 7. まとめ

ドブソン分光計を用いた反転観測では, 長期データに含まれる測定の数値にシフトが存在することが多くの研究者によって指摘されている. これらのシフトの多くは, 測器較正や測器交換に関係しており, REVUEプロジェクト以降, 再評価の試み行われてきた. このシフトには, 測器毎に異なる太陽天頂角の依存性が含まれることから, その評価のために測器同士の比較観測が重要な役割を果たした. 長期データに含まれるシフトは, 気象庁のオゾン観測ネットワークが構築された1957年から1980年後半の期間に特に多く, 最大で21Nのシフトが見積もられる. また, 測器比較で明らかになった太陽天頂角の依存性は, SZA  $> 80^\circ$  で大きく最大4Nである. オゾン鉛直分布の計算においては, 大気外定数および器械定数の変動の影響をキャンセルするためにSZA  $60^\circ$  (または, SZA  $\leq 70^\circ$ )におけるN値との差 $N(\text{SZA}) - N(60)$ を利用するが, 特に1980年代以前で多くの誤差が含まれている. これらのシフトは全てオゾン量の鉛直分布に影響を与えることになる. シフトが2Nを超え, 更に太陽天頂角への依存性を伴うことで最大20%前後の誤差が見積もられた. オゾン鉛直分布とその長期トレンドの解析においては, 誤差要因の解明と共にシフトを適正に評価することが不可欠である. 札幌, つくば, 鹿児島, 那覇の4地点について, 測器交換(測器較正を含む)に伴うシフトと反転比較資料に基づく太陽天頂角への依存性による誤差を見積もり, 過去の長期データに対して補正を施した. その補正結果を用いてオゾン鉛直分布の再計算を行った. 今回の再評価によって, 各地点の測器の交換時期に対応して見られた不連続な段差がほぼ解消されたと考えられるが, SZA依存性の評価が出来な

かった期間や他の要因については今後更に検討していくことが必要である。

### 謝 辞

今回の解析に際し、有益な意見を頂きました観測第三課長の廣瀬保雄氏に感謝すると共に、気象庁地球環境・海洋部オゾン層情報センターの方々にお世話になりましたことを深く感謝いたします。

また、編集委員会からの依頼によって本稿を校閲され、種々ご助言やご教示を頂きました査読者並びに編集委員の皆様にあわせてお礼申し上げます。

### 引用文献

- Bojkov, R. D., E. Kosmidis, J. J. DeLuisi, I. Petropavlovskikh, V. E. Fioletov, S. Godin and Ch. Zerefos (2002) : Vertical ozone distribution characteristics deduced from 40,000 re-evaluated Umkehr profiles (1957-2000). *Meteorol. Atmos. Phys.*, **79**, Issue 3 - 4, 127 - 158.
- Evans, R. D., G. L. Carbaugh, S. J. Oltmans, B. Walsh, D. M. Quincy, M. O'Neill and M. Clark (2004) : Dobson calibration scales and application to network instruments. *Proceedings of the XX quadrennial ozone Symposium in Kos Greece 2004*, **1**, 534 - 535.
- Götz, F. W. P., A. R. Meetham and G. M. B. Dobson(1934) : The vertical distribution of ozone on the atmosphere. *Proc. Roy. Soc. London*, **A145**, 416 - 446.
- 観測第三課(1984) : 「カナダからの手紙」 - オゾン分光光度計の内部散乱光について - . 高層気象台彙報, **44**, 26 - 36.
- Kosmidis, E., R. D. Bojkov, J. D. DeLuisi, I. Petropavlovskikh, D. Thuissen and C. S. Zerefos (2000) : Re-Evaluation of raw Umkehr data. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium in Sapporo in 2000*, **1**, 498 - 499.
- Mateer, C. L. and J. J. DeLuisi(1992) : A new Umkehr inversion algorithm. *J. Atmos. and Terr. Phys.*, **54** (5), 537 - 556.
- Miyagawa, K.(1996) : Development of automated measuring system for Dobson ozone spectrophotometer. *Ozone Symposium in Italy in 1996*, **2**, 951 - 954.
- Miyagawa, K.(1997) : Development of an automated system for the Dobson ozone spectrophotometer. *The Geophys. Maga. Series 2*, **2 - 1**, 77 - 107.
- 宮川幸治(1999) : ボールダーにおける WMO ドブソンオゾン測器相互比較 1998. 高層気象台彙報, **59**, 29 - 36.
- Miyagawa, K.(2004) : Upgraded automatic Dobson ozone spectrophotometer with Windows PC for ozone observation network in Japan. *Proceedings of the XX quadrennial ozone Symposium in Kos Greece 2004*, **1**, 579 - 580.
- Miyagawa, K. and Y. Hirose (2004) : Re-evaluation of long-term Dobson Umkehr N-data by intercomparison. *Proceedings of the XX quadrennial ozone Symposium in Kos Greece 2004*, **1**, 581 - 582.
- 宮川幸治(2005) : ボールダーでの WMO ドブソンオゾン分光光度計の国際相互比較. 高層気象台彙報, **65**, 77 - 86.
- Petropavlovskikh, I., J. DeLuisi and D. Theisen (2000a) : Detection of Shifts in the Umkehr N-value Radiance Records. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium in Sapporo in 2000*, **1**, 585 - 586.
- Petropavlovskikh, I., J. DeLuisi, D. Theisen, E. Kosmidis, R. Bojkov, Ch. Zerefos, P. K. Bharia and S. Godin (2000b) : Umkehr Retrieval Algorithm: on the importance of a priori information. *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium in Sapporo in 2000*, **1**, 79 - 80
- Petropavlovskikh, I., D. Theisen, J. J. DeLuisi, R. D. Bojkov and E. Kosmidis (2001) : On shifts in the long-term Umkehr radiance records and their influence on retrieved ozone profiles. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 255 - 258.
- Petropavlovskikh, I., R. D. Evans, G. L. Carbaugh, E. Millard, R. Stubi and U. Koehler (2004) : Towards a better knowledge of Umkehr measurements: a detailed study of data from ten Dobson intercomparisons. *Proceedings of the XX quadrennial ozone Symposium in Kos Greece 2004*, **1**, 594 - 595.
- Reinsel, G. C.(2002) : Trend analysis of upper stratospheric Umkehr ozone data for evidence of turnaround. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 91(1 - 4).
- Rodgers, C. D.(1990) : Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sensing measurements. *J. Geophys. Res.*, **95**, 5587 - 5595.