

ライダーで観測された成層圏バックグラウンドエアロゾルの増加 Increase of the Background Stratospheric Aerosols Observed by the Lidar Measurement

永井 智広 ^{*1,*4}, J. Ben Liley ^{*2}, 内野 修 ^{*3,*1}, 酒井 哲 ^{*1}, 柴田 隆 ^{*4}
Tomohiro Nagai ^{*1,*4}, J. Ben Liley ^{*2}, Osamu Uchino ^{*3,*1},
Tetsu Sakai ^{*1} and Takashi Shibata ^{*4}

^{*1} 気象研究所 気象衛星・観測システム研究部

^{*2} National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand

^{*3} 国立環境研究所 地球環境研究センター

^{*4} 名古屋大学 環境学研究科

^{*1} Meteorological Satellite & Observation System Res. Dep., Meteorological Research Institute

^{*2} National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand

^{*3} Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

^{*4} Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Abstract

Stratospheric aerosols play very important role on global climate change through the direct and indirect effect. Lidar observations of the stratospheric aerosol layer have been carried out at the three mid latitude sites on the both hemispheres. Evolution of the volcanic aerosols originating from the 1991 Mt. Pinatubo volcanic eruptions, and the subsequent trend and seasonal variations of the background aerosols, are evaluated. Stratospheric aerosol drastically increased to about 30 to 100 times of the background level after the eruption, and returned to calm condition after about five years. The background aerosols over Lauder, New Zealand (45°S) increased after around 2000. The increasing rate observed over Lauder is about 3.8%/year from 2000 to 2009.

1. はじめに

成層圏エアロゾルは、直接的な放射効果あるいは雲粒子の生成に関わる間接効果などを通じ、気候に大きな影響を及ぼしている。この成層圏エアロゾルは、大規模な火山噴火によって急激に増加し、噴火後数年にわたって気候に影響を与えるが、火山噴火の影響を受けない静穏な状態のエアロゾル（バックグラウンドエアロゾル）も、気候を考える際に重要である。気象研究所では、1991年のピナトゥボ火山後、国内外の南北両半球の中緯度3地点にライダーを展開し、成層圏エアロゾルの観測を行ってきている。これらの観測から、ピナトゥボ火山噴火を起源とする成層圏エアロゾルの消長やバックグラウンドエアロゾルの振る舞いの地点間の差異などが明らかになった。特に、南半球ローダー（ニュージーランド）での観測からは、バックグラウンドエアロゾルが増加している様子が観測されたので、これについて報告する。

2. 装置

ライダーは、南北半球中緯度帯の3地点、つくば（北緯36度）、那覇（北緯26度）、及びローダー（南緯45度、ニュージーランド）に展開し、1991年のピナトゥボ火山噴火以来、継続的な観測を行っている。送信部には、信頼性が高く長期観測に適したNd:YAGレーザーを用い、その第2高調波（532nm）での観測を行っている。観測期間は、つくばが1991年から、那覇は1991年9月から2005年2月まで、ローダーが1992年11月からで、つくばとローダーは現在も観測を継続しているが、つくばでは複数のシステムを併用していたこと、つくばでは2002年4月に、那覇では2001年9月に、ローダーでは2009年2月に装置を更新したため、データ解析の都合上、解析には更新以前に使用していたシステムで取得した期間に限定した。装置の代表的な諸元をTable 1に示す。

Table 1 Typical specifications of the three lidar stations since one or more systems were operated at the sites. Several systems are in operation usually at Tsukuba, and two generations of the systems were operated at Naha. A single system was used for the whole observation period at Lauder.

Station	Tsukuba	Nana	Lauder
as of	Nov. 1997	Oct. 1992	Nov. 1992
Transmitter			
Laser	Nd:YAG (SHG)		
Wavelength	532.07nm		
Pulse energy	225mJ	130mJ	135mJ
Pulse repetition	20Hz	20Hz	10Hz
Beam divergence	0.1mrad	0.2mrad	0.2mrad
Receiver			
Telescope type	Newtonian	Schmidt Cassegrain	
Telescope diameter	500mm	254mm	
Field of View	3.0mrad	2.0mrad	
Polarization	None ^(*)	P and S	
Gate width	75m	6m minimum, 96m nominal	
Detector	PMT (R331)	PMT (R1332)	
Signal Processing		Photon Counting	

* The other system(s), which has/have capability of the polarization measurement, is/are in operation any time.

3. 観測

Figure 1 に 3 地点で観測された後方散乱比の鉛直プロファイルの時間変化を示す。成層圏エロゾルは、1991 年 6 月 15 日に起こったフィリピン・ピナトゥボ火山の大噴火により急激に増大した。ピナトゥボ火山起源のエロゾルは、噴火後、1 ヶ月程度で対流圏界面の直上の高度方向に薄い層としてつくば上空で観測され、その後、より高い高度（約 22km）で観測された後、さらに高濃度となりより広い高度範囲（Fig. 1 に黒線で示してある対流圏界面の直上から約 30km）に広がった。那覇とローダーでは、観測開始がピナトゥボ火山噴火からそれぞれ約 3 ヶ月と 1 年半ほど経過していたため、観測開始時、既にエロゾルが成層圏の広い高度範囲で増大した状態であった。増大したエロゾルは、季節変化を示しながら減少し、およそ 5～6 年程度の時間を要して静穏な状態に戻った。

静穏な状態に戻ったエロゾルは、3 地点とも、ピナトゥボ火山噴火起源のエロゾルと同様に、対流圏界面から高度 30km 付近までバックグラウンドエロゾルとして分布した。つくばについては、対流圏界面高度が季節変化するのに伴い、バックグラウンドエロゾルの存在範囲も変化した。ローダーについては、2000 年以降、濃度が徐々に濃くなっている様子が観測された。つくばと那覇については、静穏な状況に戻った後、殆ど変化していないように見えるが、観測装置の都合により観測期間を限定したため、現時点での結論は得られていない。

静穏な状態に戻ったエロゾル層は、夏期と冬季で対流圏界面の状態が大きく変わる緯度帯にあるつくば（実線）においては、エロゾル層の高度に明瞭な季節変動が見られるが、これに対し、赤道帯の那覇や高緯度のローダーでは明瞭な季節変動は見られない。

Figure 2 に 3 地点での後方散乱係数の鉛直積分値（IBC ; Integrated Backscattering Coefficient）の時間変化を示す。上図がつくば、中央が那覇、下図がローダーである。図には、IBC の月平均値を太い破線で、推定したバックグラウンド量を太い実線で示している。バックグラウンド量は、1997 年 10 月から 2001 年 9 月の期間が 3 地点ともほぼ最小値となっていることから、この期間を火山噴火の影響を受けていないバックグラウンド状態と考え、この期間について、一定値に 1 年周期の季節変動を加えた関数を IBC の月平均値に最小 2 乗法を用いて当てはめ、バックグラウンドを推定した。IBC の月平均値から推定したバックグラウンド量を引いた残差を細線で示している。この量は、1997 年以前はピナトゥボ火山噴火を起源とするエロゾルの量と考えることができる。

ピナトゥボ火山噴火を起源とするエロゾルは、噴火後 8 ヶ月から 1 年半程度で最大となった。バックグラウンドエロゾルに対し、つくばで 59.5 倍、那覇で 96.4 倍、ローダーでは 31.6 倍を示したエロゾルは、つくばでは 1992 年 2 月 22 日に、那覇では 1992 年 2 月 25 日に、またローダーでは 1992 年 11 月 28 日にピークに達した。ただし、ローダーにおいては、観測の開始が 1992 年 11

月 19 日でピナトゥボ火山噴火から観測開始まで約 1 年半を経過していたこと、開始からピークまでの期間が短かったこと、ローダーでの季節変化の位相を考えると、既にピークを過ぎていた可能性が高く、実際のエアロゾルは更に多かったことが推測される。

ピナトゥボ火山噴火を起源とするエアロゾルの減衰を推定するため、ピナトゥボ火山噴火起源のエアロゾルの IBC が対数軸上で 1 年周期の変動に線形減少をするものと仮定し、1997 年以前の期間について、バックグラウンドエアロゾルと同様に最小 2 乗法を用いた当てはめを行った。つくば、那覇、ローダーの各地での減衰期間は、それぞれ、1.14 年、1.29 年及び 1.37 年 (e-folding time) であった。

ここで推定したバックグラウンドエアロゾルの IBC は、つくば、那覇、ローダーでそれぞれ $1.21 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$ 、 $0.54 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$ 、 $1.73 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$ であった。季節変化はつくばで最も顕著に観測され、その振幅是那覇やローダーに比べ、3.3 から 4.7 倍であった。この原因については、エアロゾルの濃度に相当する散乱比の値は 3 地点で大きくは異なっていないことを考えると、Fig. 1 中に黒線で示した対流圏界面高度の変化が主因であるものと推定できる。すなわち、亜熱帯的那覇においては熱帯の圏界面が、緯度が高いローダーでは極の圏界面が季節に関わらずほぼ定常的に上空に存在するのに対し、中緯度のつくばでは、夏季には高度の高い熱帯の圏界面が、冬季には高度の低い極域の圏界面が主に存在し、エアロゾル層の高度が夏季には薄く冬季には厚くなるため、エアロゾルの気柱総量が夏季に少なく冬季には多くなる変化を起こすものと考えられる。那覇において観測された IBC

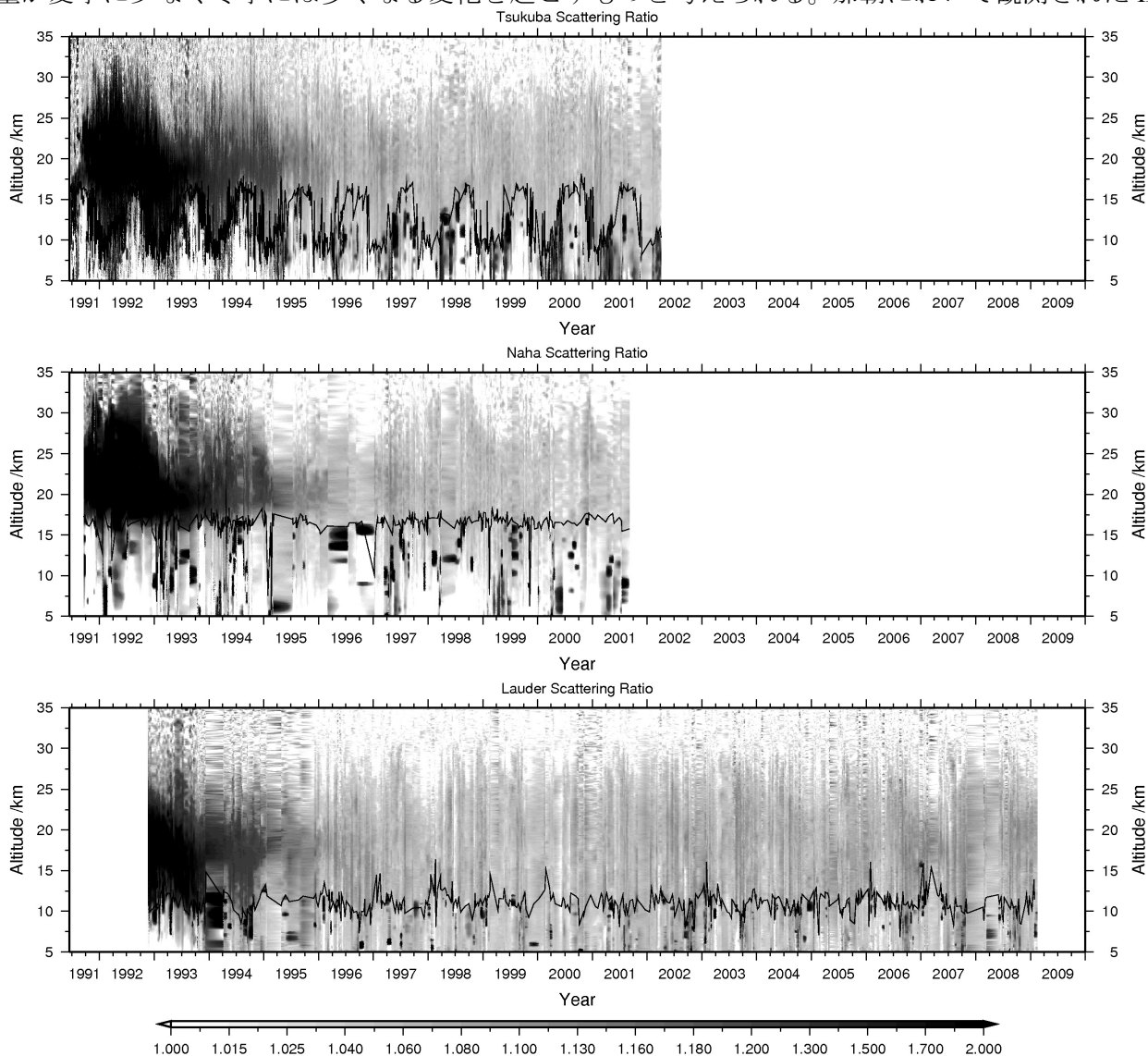


Fig. 1 Time evolution of the lidar backscattering ratio profiles observed at the three sites of Tsukuba (top), Naha (middle) and Lauder (bottom). Tropopause altitude is superimposed by the black line.

は、1997 年以降もわずかに減少している様子が見られている。バックグラウンドの推定の際には、1997 年 10 月から 2001 年 9 月の期間を最小になった期間と考えたが、ピナトゥボ火山噴火起源の影響が残っているものと考えられる。バックグラウンドエアロゾルの動態の特性値については、ピナトゥボ火山噴火起源のエアロゾル特性と合わせ、Table 2 に示した。

Table 2 Characteristics of the Pinatubo and the background aerosols. The background aerosols are determined from a period from October 1997 to September 2001.

Station	e-folding time of Pinatubo aerosols	Maximum IBC of the Pinatubo aerosols (MAX _{IBC})	Ratio of MAX _{IBC} to BG	Background IBC (BG) (Oct. '97-Sep. '01)	Amplitude of annual variation of BG (Vamp)	Ratio of Vamp to BG
Tsukuba (36N)	1.14 year	$7.20 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$	59.5	$1.21 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$	$6.84 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$	0.56
Naha (26N)	1.29 year	$5.21 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$	96.4	$0.54 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$	$0.67 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$	0.12
Lauder (45S)	1.37 year	$4.49 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$	31.6	$1.42 \times 10^{-4} \text{ sr}^{-1}$	$1.73 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$	0.17

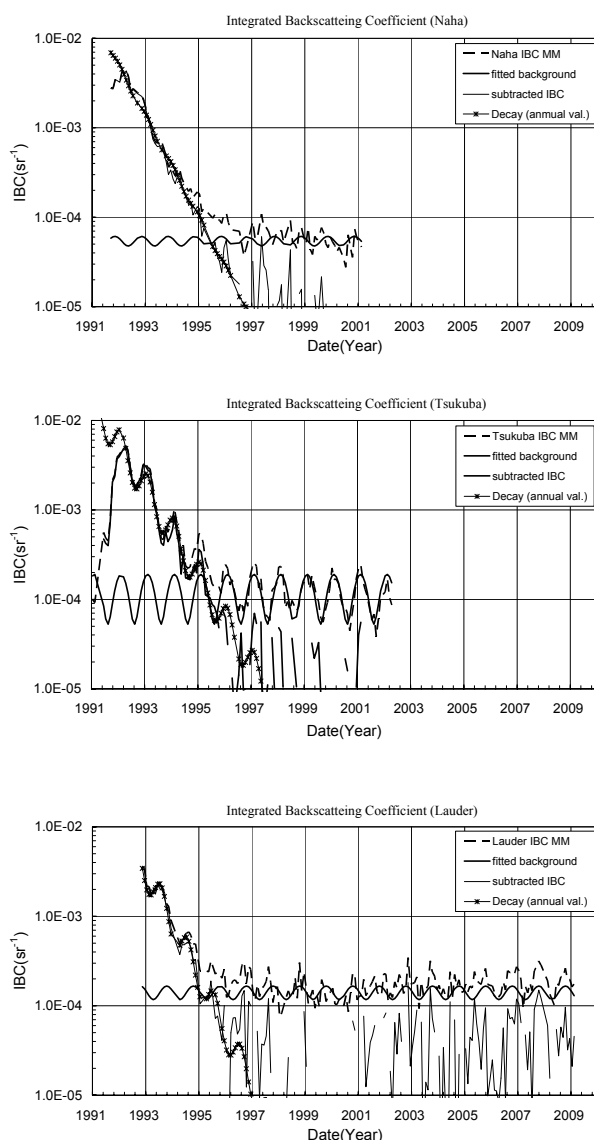


Fig. 2 Monthly mean IBC (dashed thick) and fitted background lines (solid thick) of the three stations of Tsukuba (top), Naha (middle) and Lauder (bottom). Thin lines show the residuals of the IBCs and thin line + “*” show the fitted lines of the Pinatubo aerosols.

ローダーでの観測からは、2000 年以降、バックグラウンドエアロゾルが増加している様子が、Fig. 1、Fig. 2 下図などで見ることができる。これを定量化するため、バックグラウンドに線形増加項を付け加えた式を 2000 年以降について当てはめを行った。その結果を Fig. 3 に示す。バックグラウンドエアロゾルの増加率は $5.5 \times 10^{-6} \text{ sr}^{-1}/\text{年}$ (3.8%/年) であった。このような現象は、まだ殆ど報告がなく、その原因についても今後の検討が必要と考えられる。

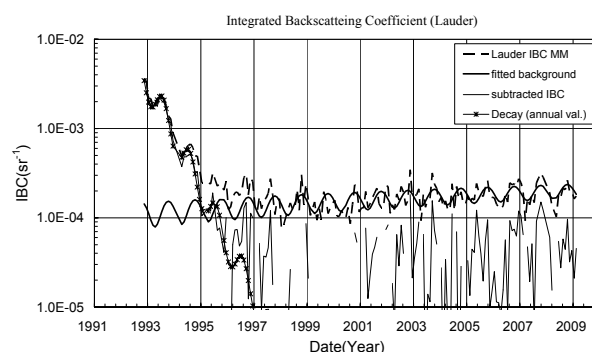


Fig. 3 Same as the bottom panel of Fig. 2 but including the linear increasing term for the fitted curve (solid thick) and estimated Pinatubo aerosols (thin line + “*”) and residuals of IBC (Thin line) are shown.

4. おわりに

ここで展開した装置は、那覇を除き、装置をより高度 (2 波長+多チャンネル) なものに更新し、現在も観測を継続中である。今後も継続した観測を行って、成層圏エアロゾルが気候へ与える影響を調査するための基礎資料として、観測を継続する予定である。

< 謝 辞 >

本研究は、科学技術庁 (当時、現文部科学省) の科学技術振興調整費の複数の研究計画の支援を受けた。観測に際し、那覇では沖縄气象台、ローダーでは NIWA ローダー大気観測所から、観測場所の提供や人的支援を受けた。ここに深く感謝の意を表します。