

エアロゾルゾンデによる南極昭和基地上空の成層圏・ 対流圏エアロゾル濃度の季節・経年変化の観測

木津暢彦^{1*}・林 政彦²・山内 恭^{3,4}・岩坂泰信⁵・渡辺征春⁶

Seasonal and annual variations of aerosol concentrations in the troposphere and stratosphere over Syowa Station observed by a balloon-borne optical particle counter

Nobuhiko Kizu^{1*}, Masahiko Hayashi², Takashi Yamanouchi^{3,4}, Yasunobu Iwasaka⁵
and Masaharu Watanabe⁶

(2010年3月15日受付; 2010年4月12日受理)

Abstract: This report summarizes observations of tropospheric and stratospheric aerosols by a balloon-borne optical particle counter (Aerosol sonde) performed at Syowa Station from April 1997 to January 2008.

Typical seasonal changes in the stratospheric aerosol layer were characterized by sedimentations of the stratospheric aerosol layer in autumn, PSCs activity in winter, and sudden increase in aerosol concentration at the end of spring. The annual change shows that the perturbations of stratospheric aerosol caused by the eruption of Mt. Pinatubo in 1991 remained until 1999. Additionally, seasonal variation of tropospheric aerosol shows clear differences between concentrations from January to June and those from July to December.

要旨: 昭和基地 (69°00'S 39°35'E) において、1997年4月~2008年1月まで、気球搭載光散乱式粒子計数装置 (エアロゾルゾンデ) による75回の観測を実施し、地上から高度約30 kmまでの半径0.15~3.5 μmの領域の粒径分

¹ 気象庁, Japan Meteorological Agency, Otemachi 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122.

² 福岡大学理学部地球圏科学科, Department of Earth System Science, Faculty of Science, Fukuoka University, 8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180.

³ 情報・システム研究機構国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

⁴ 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻, Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

⁵ 金沢大学フロンティアサイエンス機構, Frontier Science Organization, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192.

⁶ 産業技術総合研究所, National Institute of Advanced Science and Technology, 1-8-31 Midorigaoka, Ikeda-shi Osaka 563-8577.

* Corresponding author. E-mail: kizu@met.kishou.go.jp

布の経年変化、季節変化等のデータを得た。

成層圏エアロゾルには、バックグラウンドエアロゾル層の秋から冬にかけての沈降、冬の極成層圏雲の活動、夏の極渦の崩壊に伴う成層圏エアロゾル層の復帰という季節変化などが見られ、経年変化の解析からは1991年のピナツポ火山噴火の影響が南極においても1999年頃まで残っていたことが示唆された。

また、自由対流圏のエアロゾル濃度は、1-6月に比べて7-12月の濃度が有意に高いという季節変化を示した。

1. はじめに

エアロゾルは対流圏から下部成層圏にわたって広く分布し、その構成物質は、海塩、鉱物、硫酸(塩)、火山灰、生物、宇宙塵などの自然起源のものや、硫酸、硝酸(塩)、「すす」など主として人為起源のものまで、極めて多様である。

これらエアロゾルは大気諸現象にさまざまな過程で関与する。例えば、地球の熱収支という観点では、光の散乱、吸収、反射としての直接的な関与がある一方で、雲活動の一環として間接的に作用する。物質循環という観点では、降水により大気から除去されるまでに、気体または液体との間で物質交換を行い、間接的に気候に影響を及ぼしている。このため、エアロゾルの空間分布や季節変動を把握することは、地球の気候システムを理解する上で非常に重要であると考えられ、世界中でさまざまな大気エアロゾル観測が行われている。

一方で、1980年代にオゾンホールが発見され、その後オゾン層の破壊現象には極成層圏雲(Polar Stratospheric Clouds; 以下、「PSCs」と記す。)が関与していることが認められはじめた(Solomon, 1999 etc.)。極域では冬期、太陽光による加熱が無いため長波放射が卓越し、下部成層圏は著しい低温となる。この低温下において、成層圏に存在する硫酸エアロゾルは硝酸(HNO_3)や水(H_2O)などを取込み、PSCsとなる。十分に大きくなったPSCsは重力沈降を起こし、成層圏の硝酸などの窒素酸化物を対流圏へと輸送し、成層圏の窒素酸化物濃度を低下させる。窒素酸化物濃度の低下は、オゾン層の破壊をもたらす ClO_x (Cl, ClO)の不活性物質(ClONO_2)への変換を阻害し、 ClO_x はオゾン層の破壊サイクルに寄与し続けることになる。このため、PSCsの振る舞いと機構を明らかにすることはオゾンホールの形成発達を予想する上で重要である。

PSCsの核となる硫酸塩は、成層圏まで拡散した海洋性プランクトンから放出される硫黄化合物のうちの COS や CS_2 、火山活動により直接成層圏に注入される SO_2 などの光化学反応によって生成する硫酸により形成されると考えられている。硫酸に変化した場合、その飽和蒸気圧の低さから液滴粒子となり、夏場は成層圏のエアロゾル層を形成する。極域は、これらのバックグラウンドエアロゾルの成層圏から対流圏への主要な流出部の一つと考えられる。

極域対流圏におけるエアロゾルの動態は、低緯度側からの流入、極夜と白夜の極端な光放射条件の季節変化に加え、上記の成層圏からの流入によっても影響を受けていると考えられる。しかし、特に極夜期を中心として対流圏全層にわたるエアロゾルの観測はごく限られており、基本的な量である粒径別数濃度の季節変化さえも明らかになっていない。

極域の冬季における PSCs を含むエアロゾル鉛直分布の季節変化、長期のエアロゾルの特徴を調査することは、地球大気における硫黄・窒素循環、地球の熱収支、オゾン層の状態の解析や予測を行う上で不可欠な課題である。

また、極域で類を見ない上層大気エアロゾルの直接観測は、他の部門で実施される衛星やライダー観測といった観測手法の基準観測 (Saitoh *et al.*, 2006) としても重要である。

このような背景のもと、南極観測の第 V 期 5 年計画のプロジェクト研究観測初年度として、気水圏系課題「極域大気—雪氷—海洋圏における環境変動機構に関する研究」により、1997 年に第 38 次日本南極地域観測隊 (以下、第 \sim 次隊) は、昭和基地及びドームふじ観測拠点で気球搭載光散乱式粒子計数装置 (エアロゾルゾンデ) を使用したエアロゾル粒径分布の直接観測を開始した (山内, 1999; 江崎ほか, 2000)。ドームふじ観測拠点でのエアロゾルゾンデ観測は第 38 次隊のみの観測であったが、昭和基地では第 39 次隊以降も観測を継続している。昭和基地におけるエアロゾルゾンデ観測は、基本的に次のタイミングで実施してきた。

- 1) 観測方法の引継ぎを兼ねた夏季の観測 (1 月頃)
- 2) PSCs が形成される前の大気状態を把握するための観測 (4 月頃)
- 3) PSCs が出現している時の観測 (5-8 月)
- 4) オゾンホール of the 時期 (9-11 月)

2008 年 1 月 (第 48 次隊) までに年間 4-9 回 (1997 年から通算 75 回) の観測を実施した。これらのデータは、南極成層圏・対流圏における唯一の通年エアロゾル直接観測データである。

本稿では、昭和基地で行ったエアロゾルゾンデ観測についての手法等について紹介すると共に、下部成層圏及び対流圏のエアロゾル数濃度の季節変化と、1997 年からの 11 年間の変化について述べる。

2. エアロゾルゾンデ

2.1. エアロゾルゾンデ及び地上設備

(a) エアロゾルゾンデ

観測に用いるエアロゾルゾンデは、エアロゾル濃度を計測するための粒子計測部 (以下、「OPC 部」) と気象要素 (気温、気圧、湿度等) を測定するためのレーウィンゾンデ部 (または GPS ゾンデ部) により構成される。おのおのは信号線や電源線で連結し、3000 g ゴム

気球（浮力錘浮力 7000 g のヘリウムガスを充填）により飛揚する（図 1）。

粒子計測部では 4 秒または 20 秒間の粒子積算値やポンプ回転数等、エアロゾル濃度を計測するために必要なデータを取得すると共にレーウィンゾンデ部（または GPS ゾンデ部）から気象要素信号を取得し、レーウィンゾンデ部（または GPS ゾンデ部）の発信器部より地上受信設備へデータ送信を行っている。エアロゾルゾンデについては、2005 年から OPC 部の多チャンネル化ならびにレーウィンゾンデ部の変更（GPS ゾンデ化）を行ったため、これまでの観測は 2 つのタイプのエアロゾルゾンデで行われている。詳細を表 1 に示す。なお本稿においては、5 チャンネルの OPC 部を使用したエアロゾルゾンデ (Hayashi *et al.*, 1998) を「5 ch OPC ゾンデ」、8 チャンネルの OPC 部を使用したエアロゾルゾンデ (Iwasaki *et al.*, 2007) を「8 ch OPC ゾンデ」と記す。

(b) 地上設備

エアロゾルゾンデ観測の地上設備は、高層気象観測システム（例えば高層用ゾンデやオゾンゾンデのデータを受信・処理する共通システム）として空中線部、受信部及びデータ処理部で構成される。2005 年（第 46 次隊）には昭和基地の高層気象観測システムの更新により、扱うラジオゾンデも GPS ゾンデとなった。これにより、上空の測風方法はパラボラ

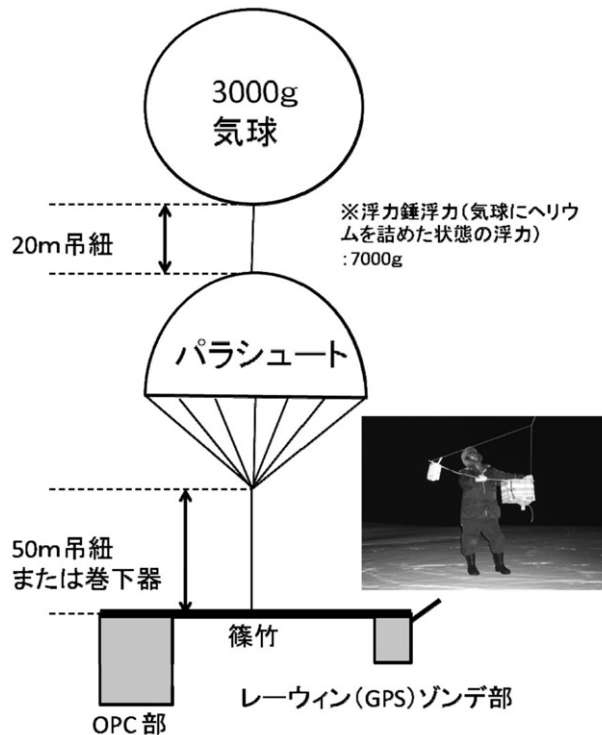


図 1 エアロゾルゾンデ飛揚荷姿

Fig. 1. Configuration of Aerosol sonde.

表1 エアロゾルゾンデの仕様
Table 1. Specification of Aerosol sonde.

1997年 (第38次隊) ～ 2004年 (第45次隊)	98型5ch OPCゾンデ	レーウィン ゾンデ部	RS2-91型 レーウィンゾンデ	気温, 湿度, 気圧, OPC部のデータを符号化後, 発信機部(404.5 MHz)により地上設備へアナログ送信*1
		粒子計測部 Optical Particle Counter (ADS-95-5N) (ADS-98-5N)	エアサンプリング	ポンプ : アルミギアポンプ サンプリング流量: 約 3000 cm ³ /min シースエア : 約 500 cm ³ /min
			粒子検出方式	光源 : レーザーダイオード 散乱角 : 前方散乱方式 検出素子: シリコンフォトダイオード
			粒径区分	5ch同時計数方式 (粒子半径 0.15, 0.25, 0.4, 0.6, 1.8 μm*3より 大きい粒子を計測)
			粒子サンプリング	20秒積算値
2005年 (第46次隊) ～	02型8ch OPCゾンデ	GPS ゾンデ部	RS-01G GPSゾンデ	気温, 湿度, GPSデータ及びOPC部のデータを発信機部(1680 MHz)よりデジタル送信*2
		粒子計測部 Optical Particle Counter (ADS-02-8CH)	エアサンプリング	ポンプ : アルミギアポンプ サンプリング流量: 約 3000 cm ³ /min シースエア : 約 500 cm ³ /min
			粒子検出方式	光源 : レーザーダイオード 散乱角 : 側方 60° 散乱方式 検出素子: シリコンフォトダイオード
			粒径区分	8ch同時計数方式 (粒子半径が 0.15, 0.25, 0.4, 0.6, 1.0, 1.8, 2.5, 3.5 μm*3より 大きい粒子を計測)
			粒子サンプリング	4秒積算値

*1: 地上施設 (JMA-91型高層気象観測システムデータ処理部) によりデータ解析

*2: 地上施設 (GPS高層気象観測システム) によりデータ解析

*3: 屈折率 $m = 1.4 + 0i$ と仮定

アンテナの方位角及び高度角に頼っていた従来の方式から, GPS衛星の信号位相差から求める方式に変更となり, 上層風の観測精度も格段に高まっている。

エアロゾルゾンデにおいても, OPC (Optical Particle Counter) で測定した各種データを, それまでのベースゾンデである RS2-91型レーウィンゾンデ(明星電気製)から RS-01G型GPSゾンデ(明星電気製)を使用することとなり, OPCもそれまでの5チャンネル(半径が各0.15, 0.25, 0.4, 0.6, 1.8 μmより大きい粒子の計測チャンネル;以下, 例えば半径0.15 μmより大きな粒子計測チャンネルを「 $r > 0.15 \mu\text{m}$ 」と記す。)で測定していた粒径別カウントが8チャンネル($r > 0.15 \mu\text{m}$, $r > 0.25 \mu\text{m}$, $r > 0.4 \mu\text{m}$, $r > 0.6 \mu\text{m}$, $r > 1.0 \mu\text{m}$, $r > 1.8 \mu\text{m}$, $r > 2.5 \mu\text{m}$, $r > 3.5 \mu\text{m}$)となった。

上昇中のエアロゾルゾンデからは, ベースゾンデで測定した高度, 気温, 湿度のデータのほか, OPCにより観測された4秒ごと(5ch OPCゾンデは20秒ごと)の各粒径カウント数, OPC部の内部温度, 排気温度, 気圧, ポンプの回転数及びレファレンス電圧等の生の情報が地上設備に送信される。これらの情報はデータ処理部において, ノイズの削除, 各粒径カウント合計量以外のレファレンス補正, ポンプ効率, 流量効率等を施した後, 各粒径カウント値及び流量を求めて濃度を算出している。

2.2. エアロゾルゾンデ観測

1997年(平成9年)~2008年(平成20年)にかけて実施したエアロゾルゾンデの飛揚結果を表2に示す。いずれの観測も気象庁及び国立極地研究所気水圏研究部門の共同観測によるものであり、観測結果については、気象庁から南極気象資料(Antarctic Meteorological Data)として公表している。

2.3. 新旧エアロゾルゾンデの特性比較

昭和基地におけるエアロゾルゾンデ観測は、1997年~2004年まで使用していた5ch OPCゾンデ及び2005年から使用されている8ch OPCゾンデにより行われていたことは前述のとおりである。この2つのタイプのエアロゾルゾンデは、ともに光源(レーザー光)

表2 昭和基地において実施したエアロゾルゾンデ観測(1997-2008年)
Table 2. Summary of aerosol sonde observation at Syowa Station (1997-2008).

隊次	飛揚番号	飛揚日			ゾンデ番号	OPC型式	データ取得高度		隊次	飛揚番号	飛揚日			ゾンデ番号	OPC型式	データ取得高度	
		年	月	日			気圧(hPa)	高度(km)			年	月	日			気圧(hPa)	高度(km)
38	1	1997	04	02	H7125	ADS-95-5N	28.3	23.6	44	41	2003	02	22	H9241	ADS-98-5N	5.0(*)	36.1
	2	1997	05	27	H7127	ADS-95-5N	9.2	29.2		42	2003	04	03	H9245	ADS-98-5N	12.5	28.8
	3	1997	07	03	H7134	ADS-95-5N	13.4	26.2		43	2003	06	19	H9246	ADS-98-5N	5.0	31.9
	4	1997	08	19	H7135	ADS-95-5N	9.2	28.2		44	2003	07	25	H9247	ADS-98-5N	6.9	29.4
	5	1997	09	22	H7137	ADS-95-5N	13.1	26.8		45	2003	09	24	H9248	ADS-98-5N	7.6	29.9
	6	1998	01	28	H8161	ADS-95-5N	11.6	30.7		46	2003	11	05	H9249	ADS-98-5N	6.2	34.0
39	7	1998	04	30	H8163	ADS-95-5N	5.0(*)	33.3	47	2003	12	05	H9250	ADS-98-5N	6.3	35.0	
	8	1998	07	14	H8166	ADS-95-5N	8.7	28.1	48	2004	01	13	H9213	ADS-98-5N	6.3	35.2	
	9	1998	09	24	H8164	ADS-95-5N	11.2	27.7	49	2004	04	18	H9254	ADS-98-5N	19.6	25.4	
40	10	1998	10	06	H8149	ADS-95-5N	14.8	26.1	50	2004	06	18	H9255	ADS-98-5N	5.0(*)	32.0	
	11	1999	02	02	H9180	ADS-98-5N	5.5	35.9	51	2004	07	07	H9257	ADS-98-5N	5.8	30.2	
	12	1999	04	26	H9181	ADS-98-5N	16.9	26.1	52	2004	09	18	H9258	ADS-98-5N	365.4	7.0	
	13	1999	06	18	H9190	ADS-98-5N	44.7	19.5	53	2004	10	18	H9256	ADS-98-5N	120.4	13.7	
	14	1999	06	29	H9191	ADS-98-5N	6.0	33.8	54	2005	05	20	H20043	ADS-02-8CH	10.4	28.8	
	15	1999	07	11	H9192	ADS-98-5N	7.3	29.0	55	2005	06	27	H20044	ADS-02-8CH	31.4	21.3	
	16	1999	09	08	H9183	ADS-98-5N	7.2	30.1	56	2005	08	08	H20045	ADS-02-8CH	7.6	29.3	
	17	1999	10	27	H9193	ADS-98-5N	8.2	30.6	57	2005	08	18	H20046	ADS-02-8CH	6.3	30.5	
41	18	2000	01	22	H9188	ADS-98-5N	17.8	27.6	58	2005	09	30	H20047	ADS-02-8CH	9.1	29.2	
	19	2000	04	17	H9197	ADS-98-5N	29.6	22.9	59	2005	11	12	H20048	ADS-02-8CH	11.1	30.1	
	20	2000	06	15	H9198	ADS-98-5N	23.5	23.3	60	2005	11	21	H20022	ADS-02-8CH	14.6	28.2	
	21	2000	06	27	H9199	ADS-98-5N	13.9	25.8	61	2005	11	21	H9259	ADS-98-5N	13.7	28.6	
	22	2000	07	13	H9200	ADS-98-5N	8.6	28.3	62	2005	12	25	H20049	ADS-02-8CH	9.2	32.5	
	23	2000	10	16	H9201	ADS-98-5N	16.9	26.8	63	2006	01	24	H20050	ADS-02-8CH	6.5	35.0	
	24	2001	01	20	H9202	ADS-98-5N	9.2	32.5	64	2006	04	29	H20052	ADS-02-8CH	9.8	29.5	
42	25	2001	03	18	H9207	ADS-98-5N	5.0(*)	35.3	65	2006	07	24	H20053	ADS-02-8CH	7.8	28.9	
	26	2001	04	18	H9195	ADS-98-5N	5.0(*)	33.6	66	2006	08	04	H20054	ADS-02-8CH	4.9	31.7	
	27	2001	06	03	H9208	ADS-98-5N	7.5	30.4	67	2006	08	13	H20072	ADS-02-8CH	8.0	28.9	
	28	2001	06	30	H9209	ADS-98-5N	5.0(*)	31.6	68	2006	09	15	H20066	ADS-02-8CH	645.8	3.1	
	29	2001	07	16	H9211	ADS-98-5N	25.9	22.5	69	2006	10	01	H20059	ADS-02-8CH	6.8	30.9	
	30	2001	08	05	H9212	ADS-98-5N	10.4	26.9	70	2006	12	08	H20069	ADS-02-8CH	5.7	35.3	
	31	2001	10	09	H9214	ADS-98-5N	15.4	25.8	71	2007	01	15	H20073	ADS-02-8CH	7.2	34.1	
	32	2001	11	28	H9215	ADS-98-5N	5.0(*)	36.4	72	2007	07	11	H20022	ADS-02-8CH	14.4	25.5	
43	33	2002	01	22	H9229	ADS-98-5N	84.9	17.0	73	2007	08	28	H20091	ADS-02-8CH	10.7	27.4	
	34	2002	04	13	H9230	ADS-98-5N	5.0(*)	34.5	74	2007	10	19	H20093	ADS-02-8CH	14.6	27.1	
	35	2002	06	27	H9232	ADS-98-5N	7.7	29.6	75	2008	01	09	H20094	ADS-02-8CH	7.2	34.3	
	36	2002	08	02	H9233	ADS-98-5N	5.3	31.1									
	37	2002	08	05	H9234	ADS-98-5N	6.1	30.3									
	38	2002	08	09	H9235	ADS-98-5N	11.3	26.6									
	39	2002	09	24	H9237	ADS-98-5N	14.2	26.7									
40	2003	01	07	H9238	ADS-98-5N	5.1	36.8										

(*): レーウィンゾンデの気圧限度(5 hPa)を超えた観測

をサンプルエアに照射しエアロゾルの散乱光を検出しているが、おのおの構成している OPC 部の光学系が異なる。受光領域中心が、5 ch OPC ゾンデでは照射光軸上の前方に、8 ch OPC ゾンデでは照射光軸から側方 60 度に置かれている。この散乱光の検出精度については、実験室内で PSL 粒子 (屈折率 $m=1.59+0i$) などを用いて、屈折率 $m=1.40+0i$ 相当の粒径に対する校正が行われている。また、観測データの継続性を確認するため、2005 年 11 月 25 日に両方式による比較観測のための連結飛揚が行われている。

佐藤ほか (2009) によると、比較が可能な 5 ch OPC 及び 8 ch OPC の同粒径のチャンネル、 $r>0.15 \mu\text{m}$ 、 $r>0.25 \mu\text{m}$ 、 $r>0.4 \mu\text{m}$ 、 $r>0.6 \mu\text{m}$ 及び $r>1.8 \mu\text{m}$ については、数濃度が低く比較できなかった $r>1.8 \mu\text{m}$ を除いて観測値はおおむねよく一致しており、エアロゾル濃度が低い時には両ゾンデの観測値の差は相対的に大きくなる傾向であると述べている。

このことに関連して、5 ch OPC の濃度値を独立変数として求めた回帰係数は、 $r>0.15 \mu\text{m}$ で 1.17、 $r>0.25 \mu\text{m}$ で 1.16、 $r>0.4 \mu\text{m}$ で 0.98、 $r>0.6 \mu\text{m}$ で 1.11 であった。一方で、計数差が顕著な領域は成層圏のエアロゾル層に対応する。エアロゾル粒子の屈折率が校正屈折率 ($m=1.40+0i$) と異なることが計数差をもたらしている可能性がある。

データの連続性については、回帰係数と各ゾンデの敷居粒径の屈折率による違いを考慮する必要がある。

3. 観測結果

3.1. 季節ごとの特徴的な観測例

図 2 に、昭和基地における観測例として、夏季、秋季、冬季、春季の特徴的な観測結果を粒径別に示す。

夏季にあたる 1999 年 2 月 2 日の観測では、 $r>0.15 \mu\text{m}$ で対流圏界面 (8 km) 付近から上層に明瞭なユンゲ層が観測されている。このユンゲ層は、秋季にあたる 1998 年 4 月 30 日の観測でも対流圏界面 (高度約 9.5 km) 付近から上層において観測されている。ただし、その上端高度が夏季と比べて低下している (図 2a)。冬季にあたる 1997 年 8 月 19 日の観測では、圏界面 (高度約 10.6 km) よりも上層において、エアロゾル濃度が夏季の数倍となっている (図 2a, b)。微小な粒子の濃度が上昇するだけでなく、通常成層圏では見られない $r>1.8 \mu\text{m}$ よりも大きな粒子が検出されている (図 2c)。図 2 には、PSCs (TYPE-II) を代表する氷 ($\text{H}_2\text{O}=3 \text{ ppmv}$ を仮定) の析出温度線及び PSCs (TYPE-I) を代表する NAT (硝酸 3 水和物 $\text{HNO}_3=10 \text{ ppbv}$ 、 $\text{H}_2\text{O}=3 \text{ ppmv}$ を仮定) の析出温度線を示している。エアロゾル濃度の増大が見られる層では、成層圏の温度が氷の析出温度近くにまで低下していることがわかる。このようなサブミクロン粒径での濃度上昇は、硝酸-水-硫酸の 3 成分過冷却液滴の PSCs 形成に対応するものと考えられる。 $r>1.8 \mu\text{m}$ を越える粒子は、NAT や氷などの固体系の PSCs 形成に対応するものと考えられる (Hayashi *et al.*, 1998)。また、成

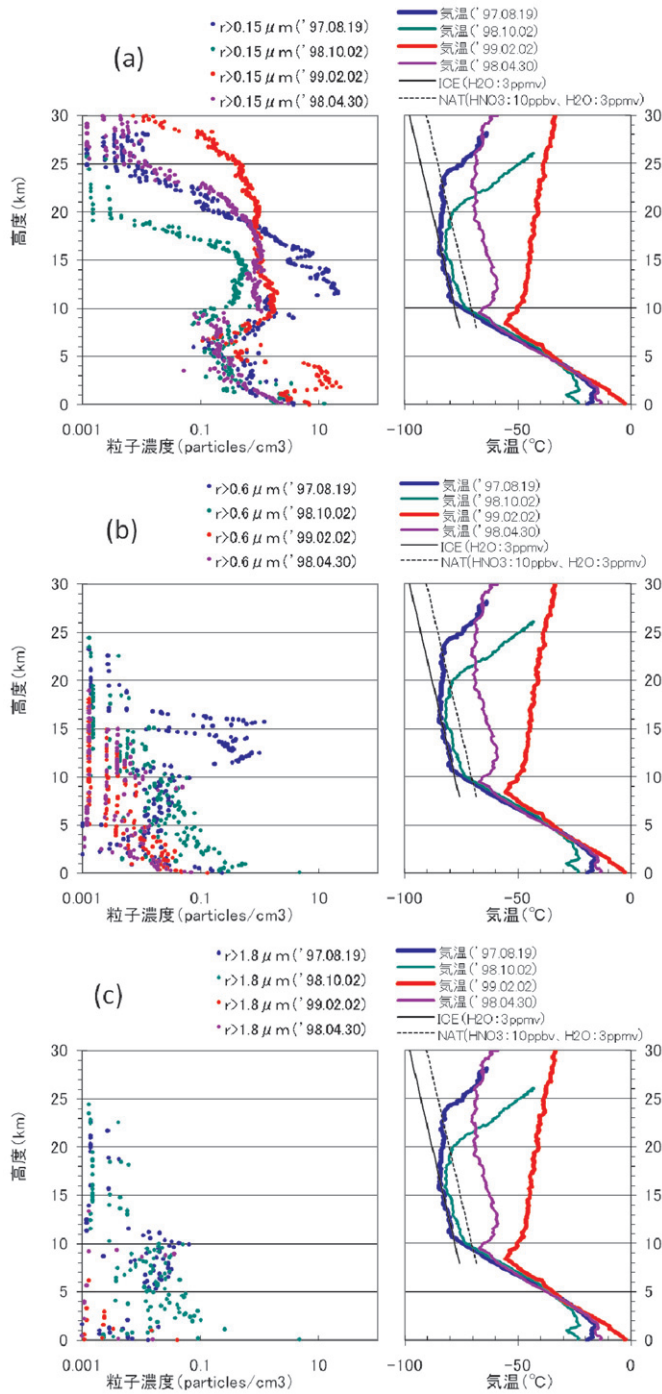


図2 昭和基地での季節ごとの代表的プロファイル
 (a) $r > 0.15 \mu\text{m}$, (b) $r > 0.6 \mu\text{m}$, (c) $r > 1.8 \mu\text{m}$
 Fig. 2. Typical seasonal profile at Syowa Station.
 (a) $r > 0.15 \mu\text{m}$, (b) $r > 0.6 \mu\text{m}$, (c) $r > 1.8 \mu\text{m}$

層圏内の薄い層として見られる気温の逆転層に対応するようにエアロゾル濃度の変化も見ることができ、このことは、小規模な温度変化に伴い PSCs 粒子の生成、発達が起きていることを示唆する。

秋季にあたる 1999 年 10 月 2 日の観測では、NAT の析出温度以下の低温となったにもかかわらず、サブミクロン粒径の PSCs は観測されていない。一方で、夏や秋にはなかった $r > 1.8 \mu\text{m}$ の粒子が見られる。冬季に成層圏が冷却して対流圏界面が不明瞭となり、成長した NAT が重力沈降により対流圏へ移流する、成層圏の「脱窒」(山内, 2009) が起きている可能性がある。

3.2. 成層圏エアロゾルの季節変動

図 3 に、高度 10 km 及び高度 20 km 面 (各層 $\pm 0.5 \text{ km}$ の平均エアロゾル濃度) の気温、 $r > 0.15 \mu\text{m}$ 及び $r > 1.8 \mu\text{m}$ のエアロゾル濃度の季節変化を示す。ここでは、観測年に関係なく一年間の通日を横軸として、すべての観測をプロットしている。

高度 20 km 面では夏季~秋季にかけて濃度がほぼ一定であるが、冬になると濃度の低下が始まる。これは極渦内の空気の沈降に伴う、成層圏エアロゾル層の上端の下降によって起きている(図 2)。冬季になると $r > 1.8 \mu\text{m}$ の粒子に顕著な濃度増加が見られる。6-8 月に、上空の気温が NAT ($\text{HNO}_3 = 10 \text{ ppbv}$, $\text{H}_2\text{O} = 5 \text{ ppmv}$ を仮定) の形成温度 (-78.5°C) 以下となることが多いことに対応している。春季になると気温の上昇はまだ顕著ではないが、 $r > 1.8 \mu\text{m}$ のエアロゾルがあまり見られなくなる。同時に、 $r > 0.15 \mu\text{m}$ のエアロゾル濃度が極端に低下している。極渦内の空気の沈降によるエアロゾル層の上端高度の沈降と、PSCs の活動鎮静化によるものと考えられる。

高度 10 km 付近でも、冬季には NAT の形成温度より低い温度の状態が継続しており、同時に $r > 1.8 \mu\text{m}$ の粒子が断続的に観測される。南極における冬季の圏界面は、温度減率により平均的には高度 10 km 付近に定義されるが、温度勾配が負であり安定度はかなり低い。このため、成層圏大気と対流圏大気との混合と、成層圏水蒸気及び硝酸蒸気の対流圏への輸送が起きやすくなっていると考えられる。

また、11-12 月になると高度 20 km で、 $r > 0.15 \mu\text{m}$ 及び $r > 1.8 \mu\text{m}$ の各エアロゾル濃度の不連続的な上昇が見られる。これは、極渦の崩壊に伴い、低緯度側との間で成層圏大気との交換が起きることによる現象である。

3.3. 成層圏エアロゾルの長期変動

図 4 に、1997 年からの高度 10 km, 15 km 及び 20 km 面における $r > 0.15 \mu\text{m}$, $r > 0.25 \mu\text{m}$, $r > 0.4 \mu\text{m}$ 及び $r > 0.6 \mu\text{m}$ のエアロゾル濃度を時系列として示す。

高度 20 km の $r > 0.15 \mu\text{m}$ のエアロゾル濃度 (図 4a) は図 3a でみたように、夏季 (12-1

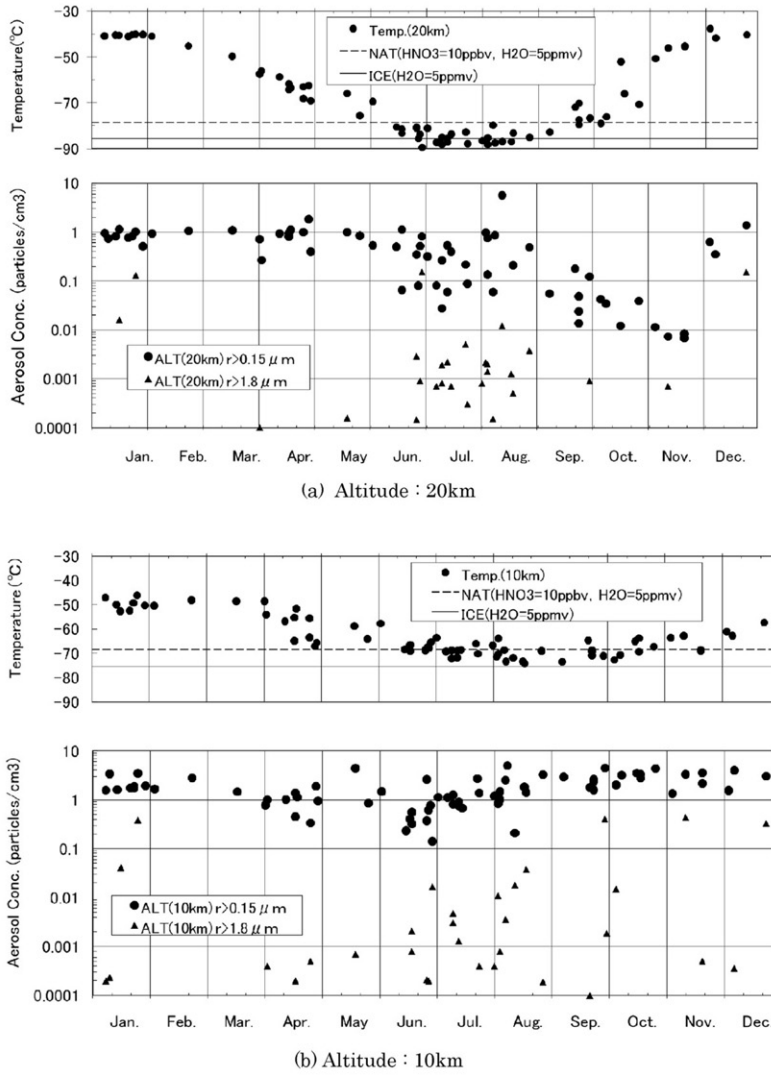


図3 昭和基地における (a) 高度 20 km, (b) 高度 10 km のエアロゾル濃度の季節変化
 Fig. 3. Seasonal change of aerosol concentration at (a) 20 km and (b) 10 km over Syowa Station.

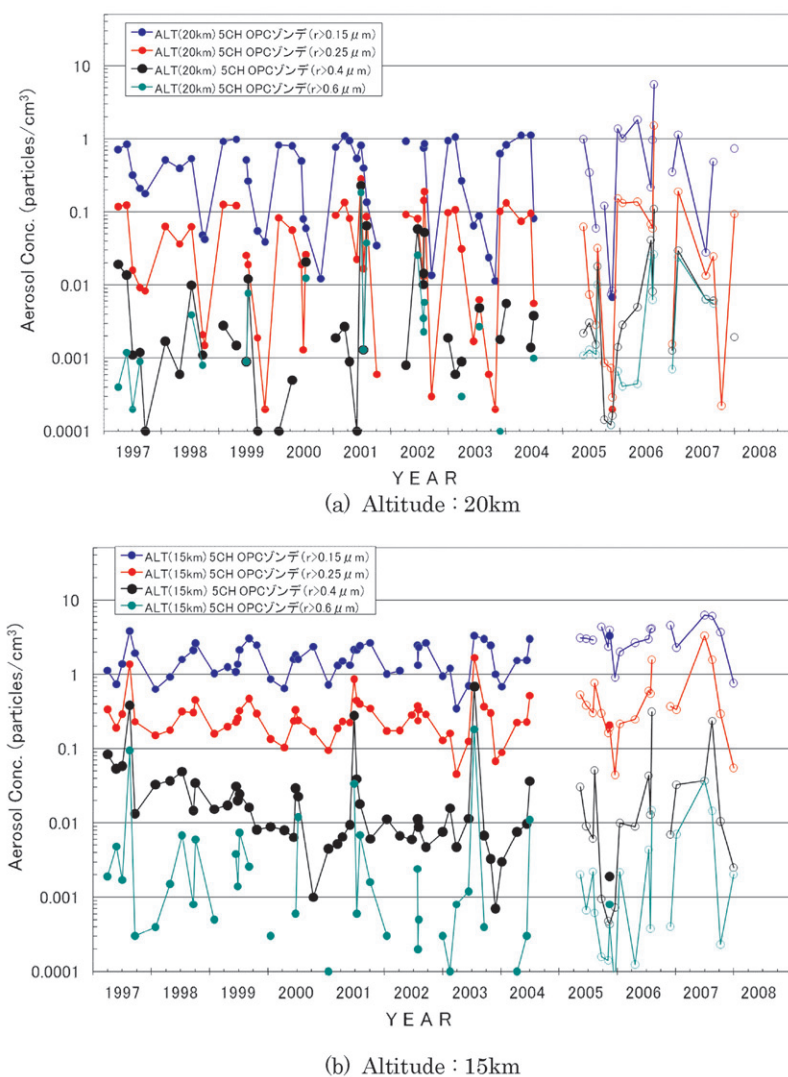


図4 1997年から2008年の昭和基地におけるエアロゾル濃度変化

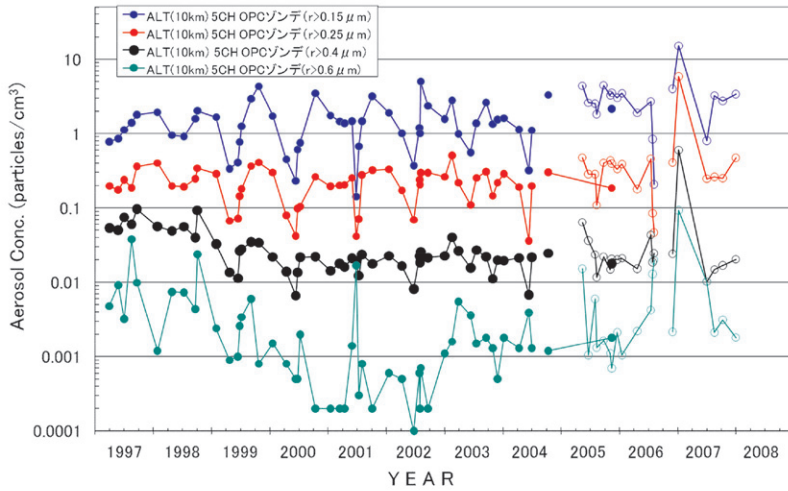
(a) 高度20 km, (b) 高度15 km, (c) 高度10 km

※図中白抜きマーカーは8 ch OPCソング観測を示す。

Fig. 4. Time series variation of aerosol concentration at Syowa Station.

(a) Altitude 20 km, (b) Altitude 15 km, (c) Altitude 10 km

※ Open circle marker shows 8 ch OPC sonde observation.



(c)Altitude : 10km

図 4 (続き)

Fig. 4. (continued).

月に高く、PSCsの活動が弱くなる春季(9-11月)に低くなるという季節変動が見られる。夏季のエアロゾル濃度は $r > 0.15 \mu\text{m}$ で1個/cm³、 $r > 0.25 \mu\text{m}$ で0.1個/cm³程度とほぼ一定となっている。しかし、春季の濃度は1997-2000年にかけて低下傾向にある。一方、図4b, cの高度15 km, 10 kmでは経年的な春季の濃度低下は見られない。高度20 km付近は、秋季のユンゲ層のほぼ上端にあたる。極渦内の大気の沈降が同程度であれば、初期状態としての夏季のユンゲ層が厚い場合に秋季の20 km付近の濃度が高くなる、というユンゲ層の厚みに対する依存性を示す。春季の濃度が高度20 km付近で経年的に低下していたという事実は、エアロゾル層の厚さが経年的に薄くなっていたことを示唆している。

また、高度15 km (図4b) 高度10 km (図4c) の $r > 0.4 \mu\text{m}$ 及び $r > 0.6 \mu\text{m}$ 程度のエアロゾル濃度は1999年まで減少傾向にあり、その後はほぼ一定となっている。北極成層圏におけるピナツボ火山の影響は、半径が約 $0.6 \mu\text{m}$ にモードをもち、1998年頃まで残っていたことが知られている (Watanabe *et al.*, 2004)。また、衛星観測によって、中・低緯度では大粒径への影響が1998年頃まで残っていたことも指摘されている (Hayashida *et al.*, 2001)。これらのことから、ピナツボ火山噴火の影響は南極においても1999年頃まで残っていたと考えられる。

3.4. 対流圏エアロゾルの季節・経年変化

図5に、高度1-7 kmのエアロゾル濃度及び気温の変化を示す。図中、 $r > 1.8 \mu\text{m}$ と $r > 0.4$

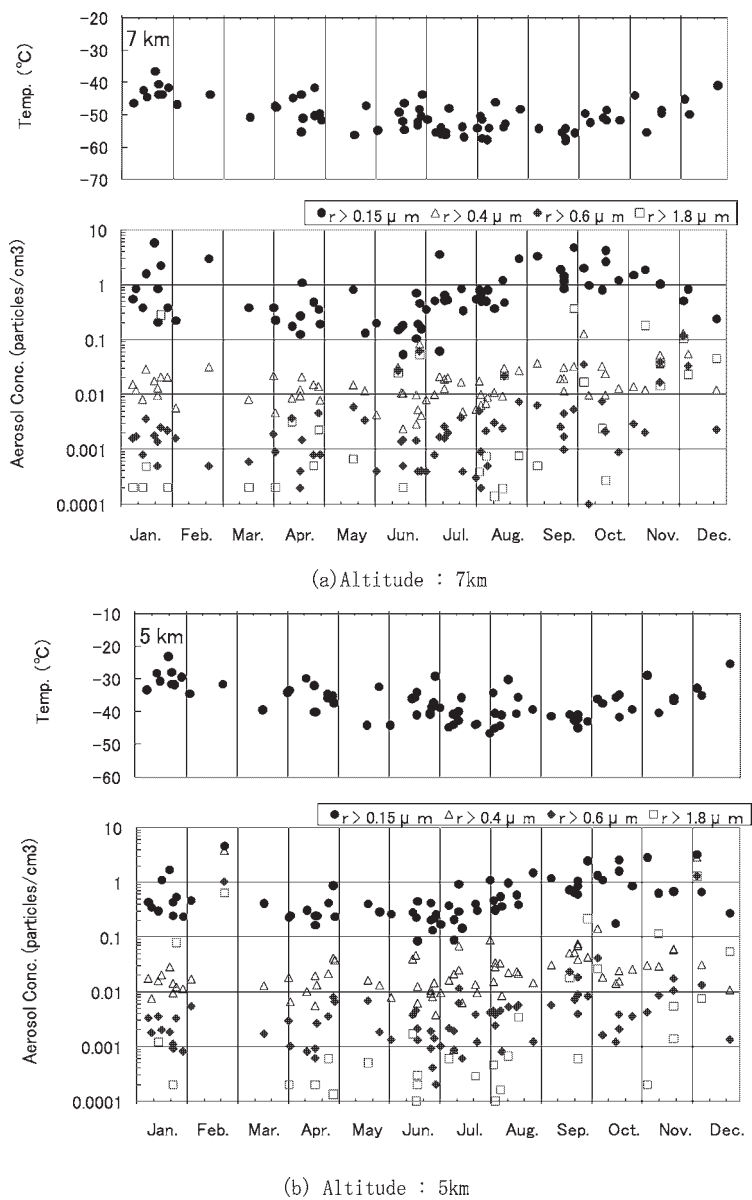
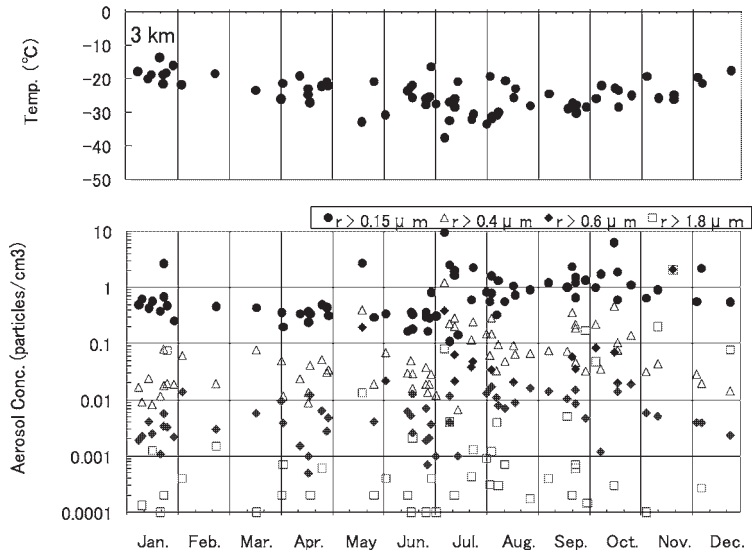
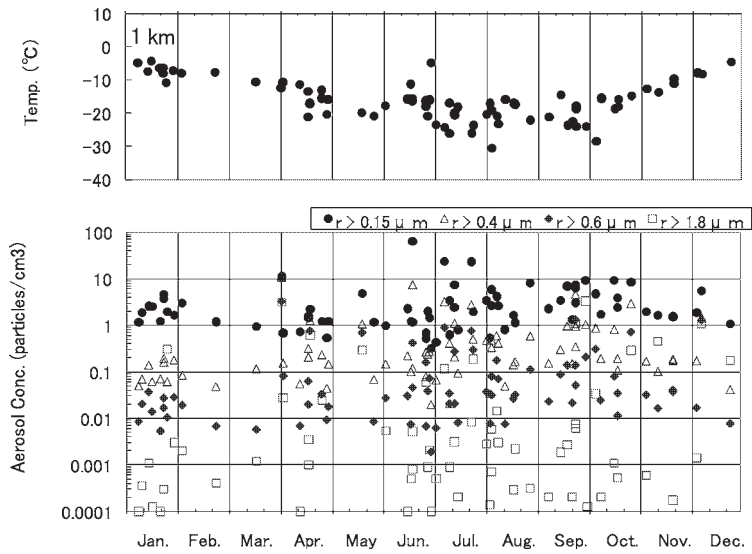


図5 対流圏エアロゾル濃度の季節変化

Fig. 5. Seasonal change of tropospheric aerosol concentration.



(c)Altitude : 3km



(d)Altitude : 1km

図5 (続き)
Fig. 5. (continued).

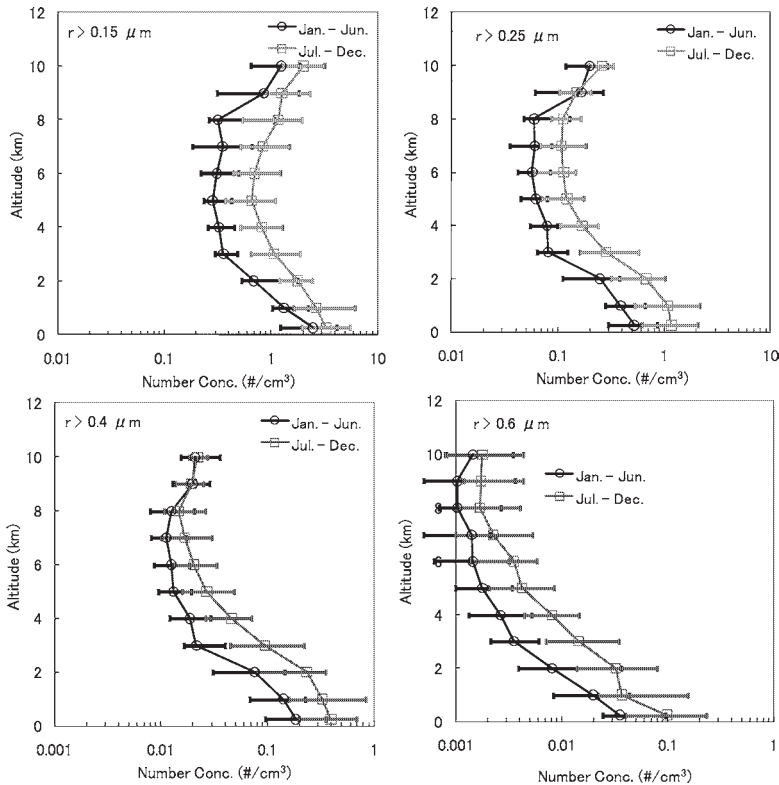


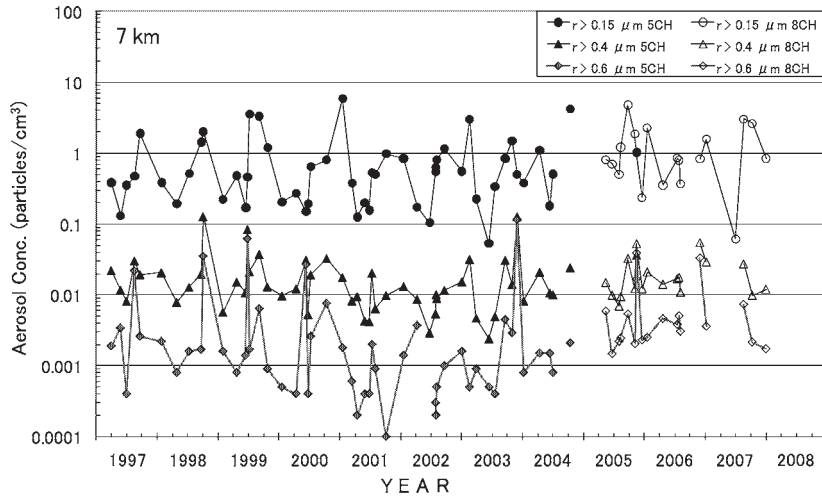
図6 粒径別エアロゾル濃度の鉛直分布
シンボルは中央値，バーは25-75%値の分布を示す。
黒：1-6月，灰：7-12月

Fig. 6. Vertical profiles of aerosol concentration.

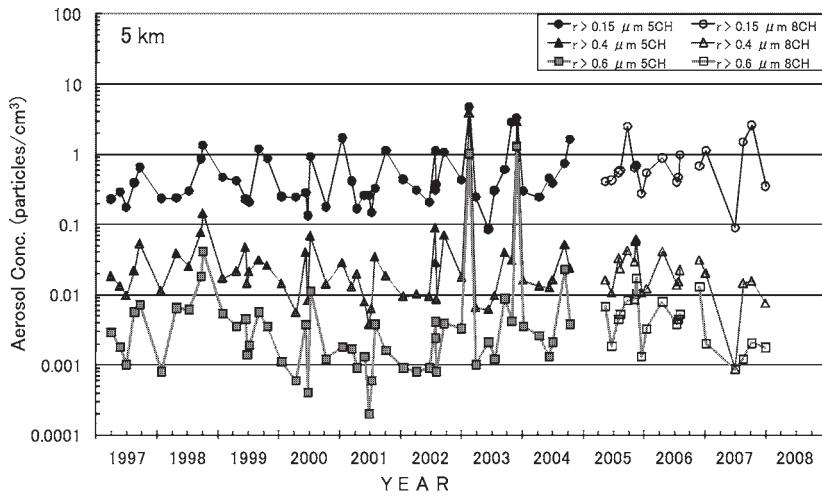
Symbols show medians and bars show values for 25% and 75% percentiles black: January to June, gray: July to December.

μm などが同程度のエアロゾル濃度になっているのは、雲粒子を観測した時に見られる現象である。もっとも顕著な季節変化は高度3 kmで見られる。高度3 kmでは、 $r > 0.15 \mu\text{m}$ のエアロゾル濃度は7月に急激に上昇し、10月までは高濃度の状態が続く(図5c)。11, 12月にエアロゾル濃度の低下が見られ、3月以降は低濃度の状態が続く。類似の変化が、 $r > 0.4 \mu\text{m}$ 及び $r > 0.6 \mu\text{m}$ の粒径でも見られる。5 kmより上空では、 $r > 0.15 \mu\text{m}$ で7月以降緩やかな濃度上昇が見られるが、 $r > 0.4 \mu\text{m}$ ではあまり明確ではない。一方、高度1 kmでは明瞭な季節変化は見られないが、全粒径で7-10月にかけて若干濃度が高くなっている傾向がある。

7月を境として急激な濃度変化が見られることから、1-6月と7-12月に1年を二分し、1 kmごとの中央値、四分位値、四分の三分位値をとったものを図6に示す。前半期(1-6月)の自由対流圏ではエアロゾル濃度が低く、鉛直方向に一様であること、後半期(7-12月)



(a) Altitude : 7km



(b) Altitude : 5km

図7 1997-2008年の対流圏エアロゾル濃度の時系列変化
 Fig. 7. Time series of tropospheric aerosol concentrations from 1997 to 2008.

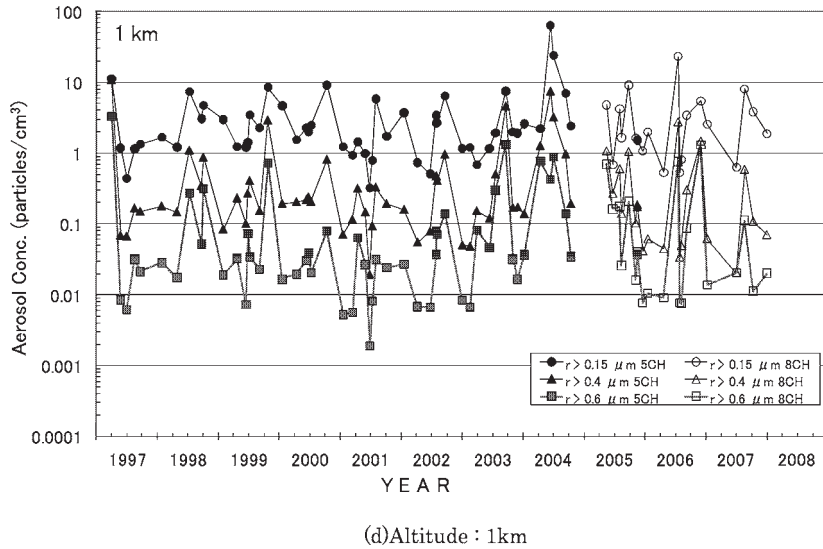
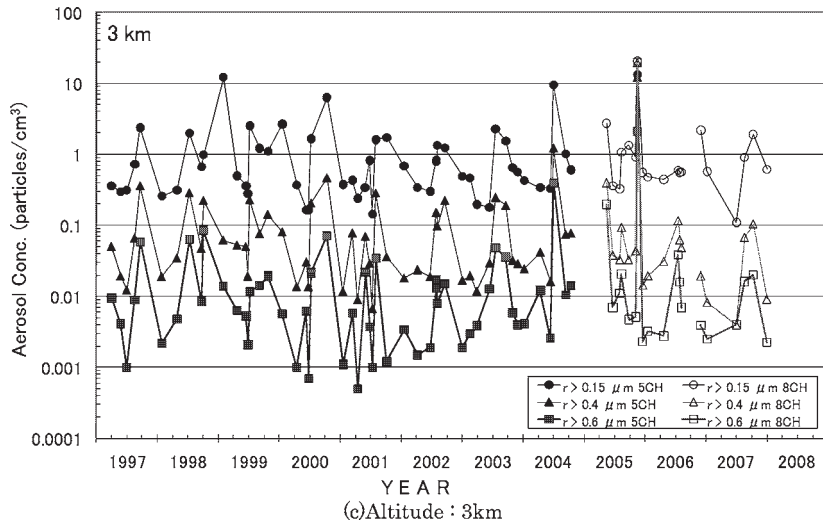


図7 (続き)

Fig. 7. (continued).

のエアロゾル濃度では、特に $r > 0.15 \mu\text{m}$ で前半期に比して高く、境界層及び成層圏では濃度変化が小さいことが大きな特徴である。これらの季節変化は、成層圏の低温化に伴う圏界面の安定度の低下と成層圏エアロゾルの対流圏への輸送、日射の回復による対流圏における光化学粒子生成、熱的不均衡の解消のための南北熱輸送に伴うエアロゾル輸送などが関与していると推測される。

図7に、1997-2008年までの11年間のエアロゾル濃度変化を示す。高度7 kmにおいて、

$r > 0.4 \mu\text{m}$ 及び $r > 0.6 \mu\text{m}$ での 2001, 2002 年付近を底とするような変化があった可能性があるが明確ではない。また, 2002-2004 年の変化で顕著ではあるが, 季節変化で見られた高度 3 km における $r > 0.15 \mu\text{m}$ のエアロゾル濃度の 7 月初頭の急増は, $r > 0.4 \mu\text{m}$ 及び $r > 0.6 \mu\text{m}$ での急増も伴っていること, また, 急増後の濃度低下も急激であることがわかる。このような急増, 急減は光化学生成よりも輸送に伴う変化であることを示唆するものである。

4. ま と め

1997 年 4 月 2 日~2008 年 1 月 9 日までの極夜期を含む約 11 年間, 昭和基地で 75 回の気球搭載光散乱式粒子計数装置による観測を実施し, 地上から下部成層圏までの $r > 0.15 \mu\text{m}$ から $r > 3.5 \mu\text{m}$ のエアロゾル粒径分布を観測した。成層圏エアロゾル層の秋から冬にかけての沈降, PSCs の活動に伴う成層圏内のエアロゾル濃度の増大や減少, 晩春期の成層圏エアロゾル濃度の急上昇が年間のサイクルとして観測された。さらに, ピナツボ火山噴火の影響は成層圏エアロゾル層の厚さと $r > 0.4 \mu\text{m}$ の濃度に 1999 年まで残存していたことが示唆された。また, 自由対流圏においては, 6 月下旬を境として, エアロゾルの低濃度期と高濃度期があることが示唆された。

謝 辞

1997 年に昭和基地で気象定常部門と気水圏研究部門が共同でエアロゾルゾンデ観測を立ち上げて以来, 2008 年までの 11 年間の観測を支え続けていただいた, 第 38-48 次日本南極地域観測隊の皆様には感謝いたします。

文 献

- 江崎雄治・栗田邦明・松島 功・木津暢彦・中島哲二・金戸 進 (2000): 第 38 次南極地域観測隊気象部門報告 1997. 南極資料, **44**, 125-204.
- Hayashi, M., Iwasaka, Y., Watanabe, M., Shibata, T., Fujiwara, M., Adachi, H., Sakai, T., Nagatani, M., Gernandt, H., Neuber R. and Tsuchiya, M. (1998): Size and number concentration of liquid PSCs: balloon-borne measurements at Ny-Ålesund, Norway in winter of 1994/95. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **76**, 549-560.
- Hayashida, S. and Horikawa, M. (2001): Anti-correlation between stratospheric aerosol extinction and the Ångström parameter from multiple wavelength measurements with SAGE II: a characteristic of the decay period following major volcanic eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4063-4066.
- Iwasaki, S., Maruyama, K., Hayashi, M., Ogino, S.-Y., Ishimoto, H., Tachibana, Y., Shimizu, A., Matsui, I., Sugimoto, N., Yamashita, K., Saga K., Iwamoto, K., Kamiakito, Y., Chabangborn, A. and Thana B. (2007): Characteristics of aerosol and cloud particle size distributions in the tropical tropopause layer measured with optical particle counter and lidar. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 3507-3518.
- Saitoh, N., Hayashida, S., Sugita, T., Nakajima, H., Yokota, T., Hayashi, M., Shiraishi, K., Kanazawa, H., Ejiri M.K., Irie, H., Tanaka, T., Terao, Y., Bevilacqua, R.M., Randall, C.E.,

- Thomason, L.W., Taha, G., Kobayashi, H. and Sasano, Y. (2006): Intercomparison of ILAS-II version 1.4 aerosol extinction coefficient at 780 nm with SAGE II, SAGE III, and POAM III. *J. Geophys. Res.*, **111**, D11S05, doi:10.1029/2005JD006315.
- 佐藤 健・西巻英明・岩城貴信・山本浩嗣・伊藤大輔 (2009): 第 46 次南極地域観測隊気象部門報告 2005. 南極資料, **53**, 136-219.
- Solomon, S. (1999): Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. *Rev. Geophys.*, **37**, 275-316.
- Watanabe, M., Iwasaka, Y., Shibata, T., Hayashi, M., Fujiwara, M. and Neuber, R. (2004): The evolution of Pinatubo aerosols in the Arctic stratosphere during 1994-2000. *Atmos. Res.*, **69**, 199-215.
- 山内 恭 (1999): 第 38 次南極地域観測隊昭和基地越冬報告 1997-1998. 南極資料, **43**, 58-95.
- 山内 恭 (2009): 南極・北極の気象と気候. 東京, 成山堂書店, 204 p (気象ブックス ; **027**).