

A-1 オゾン層変動の総合的観測及び解析に関する研究

(3) 成層圏エアロゾルがオゾン層に及ぼす影響に関する研究

① エアロゾル及びオゾンの動態に関する観測研究

研究代表者 国立環境研究所 中根 英昭

環境庁 国立環境研究所

地球環境研究グループ	オゾン層研究チーム	中根 英昭、秋吉 英治、林田 佐智子
衛星観測研究チーム		笹野 泰弘
大気圏環境部	高層大気研究室	杉本 伸夫、松井 一郎

運輸省 気象庁

観測部高層課	オゾン層解析室	内野 修、梶原 良一、福田 正人、 林 基生、杉田 興正、中川 雅之、 伊藤 朋之、上窪 哲郎
高層気象台	観測第二課	下道 正則、松原 廣次、林 則雄、

郵政省 通信総合研究所

電波応用部	光計測研究室	板部 敏和、水谷 耕平
-------	--------	-------------

(委託先)	名古屋大学	岩坂 泰信、林 政彦
(客員研究員)	名古屋大学	近藤 豊

平成5-7年度合計予算額 68,200千円
(7年度当初予算額 25,607千円)

[要旨] 半導体レーザーを光源とする新しいタイプのエアロゾルゾンデを開発した。このゾンデは、平成4年12月、大洗において、試験飛揚され各種機能において満足するべき水準にあることが確かめられ、エアロゾル層の高度による履歴の違いに関する知見が得られた。また、つくば、稚内、アラスカにおけるレーザーレーダー観測結果は、1993/1994年の冬の段階ではピナツボ火山噴火の影響が残っていることを示している。

半導体レーザーを光源とするエアロゾルゾンデ、レーザーレーダー、オゾンゾンデを用いて、スピッツベルゲン、アラスカ、北海道、つくばにおいて、エアロゾル及びオゾン鉛直分布の観測を行った。エアロゾル高度分布には、極渦内外で明瞭な違いが見られた。また、つくばにおける下部成層圏オゾン濃度は1995年の1月後半から2月前半にかけて大きく変動したが、オゾン濃度減少の原因は、極渦内部とは異なっていると考えられる。本観測は、欧州を中心とした国際協力によるオゾン層集中観測SESAME(Second European Stratospheric Arctic and Midlatitude experiment)の一環として行われた。

[キーワード] レーザー粒子計測器、エアロゾルゾンデ、レーザーレーダー、オゾンゾンデ、
S E S A M E

1. 序

オゾンホール、中緯度成層圏における顕著なオゾン減少傾向、火山噴火のオゾン層への影響等により最近の成層圏オゾンは予想を超えて減少しているが、そのいずれにも成層圏エアロゾルが関与しており、大きな関心を呼んでいる。数値モデルによるオゾン消失率の予測を行なうにあたって、火山性のエアロゾルあるいはバックグランドの硫酸エアロゾルの影響を組み入れねばならないことは多くの研究者が認めてはいるものの、観測がきわめて遅れているためにいまだ残された大きな問題となっている。また、北極域においても、極成層圏雲（P S C）の発生する頻度、領域、期間が増大しており、今後の動向、中緯度域への影響が懸念されている。

本研究がなされた期間は、ピナツボ火山噴火による成層圏エアロゾルが減少し、バックグランドに戻りつつある時期であったが、冬から春にかけてのオゾン全量は、北半球規模で見た場合、1994年に回復した後、1995年には最大規模の減少を示すなど、複雑な変動を示している。そこで本研究では、日本においてオゾンやエアロゾルを連続的に観測すると共に、アラスカや東シベリアのヤクーツクでエアロゾル等の観測を行うなど、中高緯度を一体として、エアロゾルとオゾンの動態を把握する方向で研究を進めた。とくにエアロゾルについては、鉛直分布だけではなく、粒子の大きさ別の個数、すなわち粒径分布の鉛直分布を測定する気球搭載センサーを開発し、観測に用いた。

平成5年度は、つくば、稚内、北極域におけるレーザーレーダー観測と国内における初めてのエアロゾルゾンデ観測を実施した。また、同時期及び1994年2月に集中的にオゾンゾンデ観測を行った。平成6年度は、欧州を中心とした国際的集中観測S E S A M E（Second European Arctic and Mid-latitude Experiment）が行われ、本研究においても、スピッツベルゲン、アラスカ、ヤクーツク、北海道、つくばでエアロゾル鉛直分布の観測を行った他、つくばにおいてオゾンの特別観測を行った。また、平成7年度には、ヤクーツク、北海道、つくばにおけるオゾンゾンデ観測、北海道等におけるエアロゾルレーザーレーダー観測を中心に、国内での集中観測を行うと共に、成果のとりまとめを行った。本報告書では、本サブテーマに参加している、国立環境研究所、名古屋大学太陽地球環境研究所、通信総合研究所、気象庁観測部が3年間に行った共同研究の成果、及びそれぞれの研究機関の成果を中心に取りまとめて報告する。

2. 気球搭載エアロゾル粒子計数器（エアロゾルゾンデ）の改良及び大洗における観測

成層圏エアロゾルの観測においてレーザーレーダーは、エアロゾル高度分布の連続観測に大きな役割を果たしている他、粒子の形状（従って、液滴か固体P S Cか等の情報）、多波長を用いた場合の粒径に関する情報が得られる点で協力的な測器であり、本サブテーマにおいて中心的に使用されている。しかしながら、直接にエアロゾル粒子の大きさと個数（粒径分布）を知るためには、気球に搭載した粒子計数器（OPC;Optical Particle Counter）を使用する必要がある。

名古屋大学太陽地球環境研究所では、本研究の開始に先だって気球搭載型OPC（以降、エアロゾルゾンデと記す）を開発し、使用してきたが、本研究における国内での観測をきっかけに大幅に軽量化した。

これまで観測に用いられていたエアロゾルゾンデは、ペイロード重量は15~12kgであり大気球に搭載する以外に手段はなく、放球場所や時期はきわめて限定されてきたが、従来使用していたハロゲンランプを半導体レーザーに切りかえることによって光学系に単純さと堅牢さをもたせると同時に、重量の徹底的な軽減を図り、総重量6kg未満の、小型気球で飛揚可能なものにする事ができた。波長の単色性がきわめて強くなったために、従来型のように広い粒径範囲にわたって同一測定器によってエアロゾルを観察することができなくなったが、大気エアロゾルという目的に絞れば問題はほとんど生じない。これにより、オゾンゾンデと大きくは異なる手順によりエアロゾルの粒径分布の鉛直分布を観測することができるようになった。

1993年12月13日から18日にわたって気象庁高層気象台によるオゾンゾンデ観測がつくばで実施されたが、その期間のうち12月17日に、名古屋大学太陽地球環境研究所と国立環境研究所により、エアロゾルゾンデ観測が大洗で行なわれた。

この観測により、0.425、0.52、0.8、1.2、3.6 μ m以上の直径を持つエアロゾル粒子の個数が得られたが、これにより、

- (1) ピナツボ火山影響が日本上空にもまだ残っていること、
- (2) 異なる経歴を持った空気が大洗の上空にやってきており、対流圏界面直上から50hPaまでの空気は、大きな擾乱を受けて間もないか、あるいは現になんらかの擾乱を受けつつこと、
- (3) エアロゾル観測が行なわれた12月17日のオゾンゾンデ観測結果は、この集中観測期間中では圏界面直上の濃度がもっとも低かったこと、

が明らかになった。

平成5年度に改良されたエアロゾルゾンデは、本研究において平成6年度に東シベリアのヤクーツクで使用された他、他にもスピッツベルゲンにおける極成層圏雲の観測において大きな役割を果たしている。

3. アラスカ等におけるエアロゾルの動態

3.1 中低緯度から高緯度への火山性エアロゾル物質の輸送

1991年6月にフィリピンのピナツボ山が大噴火し、多量の火山性物質が成層圏に吹き込まれた。日本におけるライダー観測から、6月の下旬から7月上旬には日本上空に火山性エアロゾルが運ばれてきたと判断された。いくつかの観測結果(夕焼けの強さ等)から、間接的ではあるが、火山性エアロゾルの雲はこの年の11月から12月にかけて北極圏のアラスカに達したと判断される(Iwasaka et al., 1993)。

今回の火山噴火では、極域でのオゾン層に対する影響あるいは中低緯度でのオゾン消失への影響が殊の外危惧されている。火山起源のエアロゾルによるオゾン破壊の「不均一過程」がオゾン破壊を増大したり、そのエアロゾルが極地方へ拡散して行って「極成層圏雲(Polar Stratospheric Clouds; PSCs)の活動を増強してオゾンホール」の規模を拡大したりする危険性があるからである。

名古屋大学太陽地球環境研究所、福岡大学理学部、およびアラスカ大学地球物理研究所の共同観測チームでは、1991年末よりアラスカのフェアバンクス郊外でライダーによるピナツボ火山雲の観測を開始した。表3.1に使用したライダーの代表的な諸元が示してある。

ライダーは、保温の効いたコンテナに搭載し、観測時は天窓を開いて鉛直上方のエアロゾル

濃度の分布を計測した。関連の気象情報は即時に入手することは比較的難しく、最低必要限度のものを現地で入手するとともに、帰国後に気象庁から発行されている解析天気図を参照して気象状況を把握している。

表3.1 ライダーの主要特性

Laser: Nd-YAG	
Wavelength	0.53 μm
Power	0.5J/pulse (Maximum)
Repetition rate	10 Hz (Maximum)
Receiving Mirror Cassegrain Type	
35 cm diameter	

エアロゾルの後方散乱光の強度をもとに、エアロゾル濃度を散乱比によって以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \text{散乱比} &= [\beta 1 + \beta 2] / [\beta 1] & (1) \\ &= 1 + [\beta 2 / \beta 1] \end{aligned}$$

ここに $\beta 1$ および $\beta 2$ は、それぞれ空気分子からの後方散乱係数と粒子状物質からの後方散乱係数である。[散乱比-1]は、しばしばエアロゾルの(光学的に見たときの)混合比とみなされている。

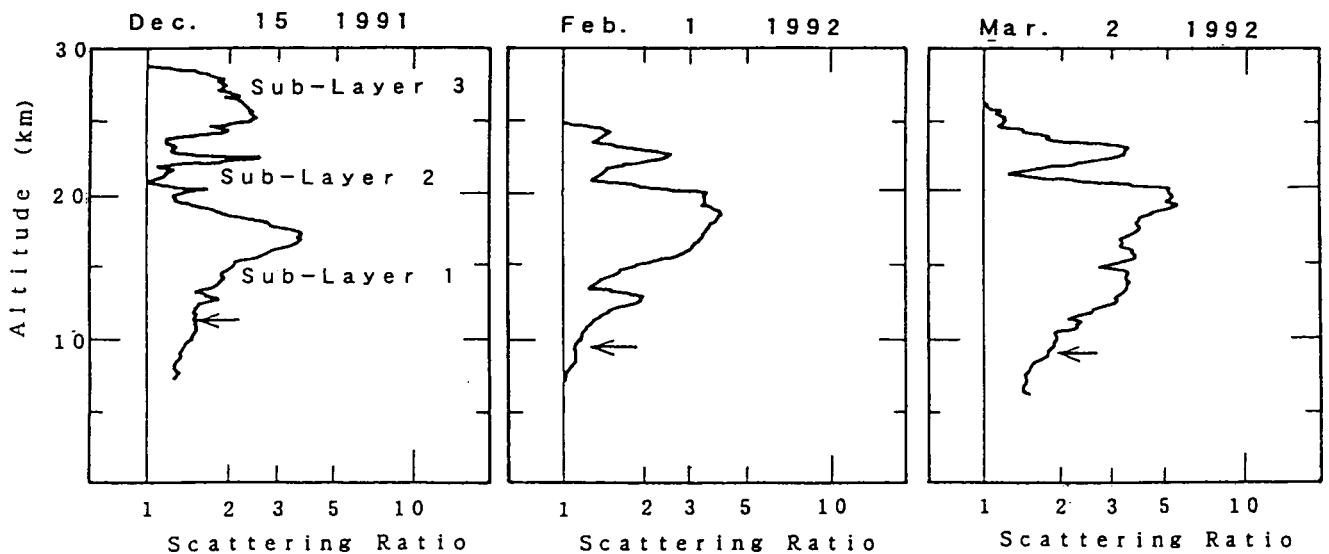


図3.1 アラスカのフェアバンクスで観測されたエアロゾルの散乱比。

1991年12月15日(左)、1992年2月1日(中央)、1992年3月2日(右)。

圏界面高度は'←'で示してある。

図3.1に示すのは、火山性エアロゾルがアラスカ域まで到達しはじめた頃の様子を示したものである。きわめて大きい（これまでに観測された例がこの地域ではないが、平穏時の成層圏エアロゾル濃度がエアロゾル層の中心部でおおよそ、 1.05 前後である）散乱比が観測されており、成層圏エアロゾル層が火山噴火によって大きく乱されていることが想像できる。

このエアロゾル層は、量の増大速度からみておおよそ3つのサブレイヤー（Sub-layer）からなっていると考えられる。17 km付近におおきなピークをもつ層は、この時期世界の各地で見られたように火山性エアロゾルを拡散した代表的な高度面で、おおくのライダー基地でこの高度のエアロゾル量が増大したことを報告している。22 kmにみられる層は、火山性エアロゾルの増大が始まった初期の段階で比較的寿命が短いものの、同様に多くの観測点で確認されている。25 km以上の層は、日本上空ではきわめて間欠的に観測されており、しかも噴火直後かなりの時期が経過したあとも確認されて例がある。アラスカでは、12月に確認されたのちにはこの高度にエアロゾル層は見られなかった。

12月15日の観測で見いだされているこれらのエアロゾル層（サブレイヤー）の代表的なピークについて流跡線を推定してみるときわめて興味あることには、サブレイヤー3に対応する空気塊は、サブレイヤー1や2の高度に対応する空気塊と異なって、かなり低緯度から比較的短時間で（おおよそ8日程度で）北極圏へ到達している点である。このように移動速度の早い物質輸送がしばしば観測されることなのか、あるいはここでみるように比較的高度の高い領域でのみ生じるものなのかについては、観測例をさらに増やして解析する必要がある。また、サブレイヤー1および2の流跡線は典型的なもので極の周辺を回転するものであった（Iwasaka et al., 1994）。

成層圏におけるエアロゾルの気柱濃度に対応するものとして、積分（エアロゾル）後方散乱係数がしばしば使用される。

$$\text{エアロゾルの積分後方散乱係数} = \int \beta_2(Z) dZ \quad (2)$$

ここで、 Z は高度を示し、積分は対流圏界面高度から成層圏エアロゾル層の上端部までおこなう。

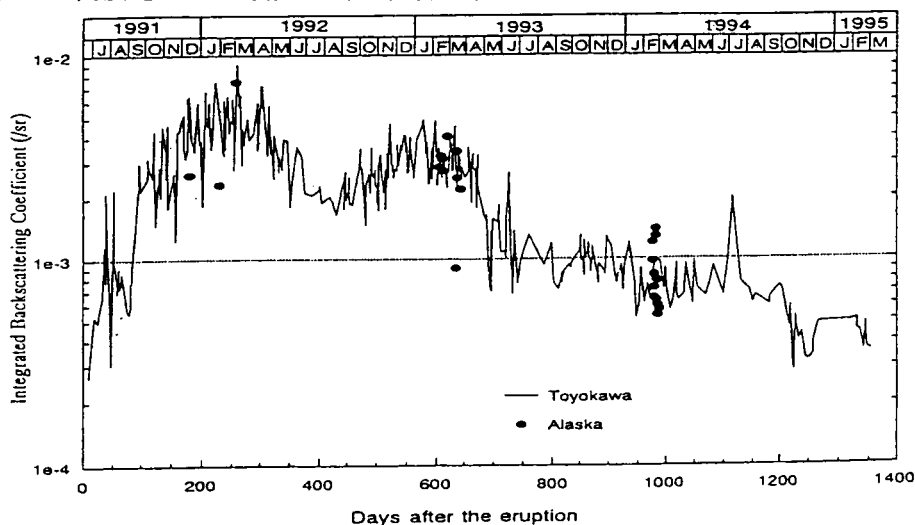


図3.2 アラスカで観測されたエアロゾル積分後方散乱係数と豊川でアラスカで観測されたエアロゾル積分後方散乱係数の比較。

図3.2には、アラスカで観測されたものと日本の豊川(34°N, 137°E)で観測されたものが比べてある(なお、豊川で使用しているライダーのレーザ波長はアラスカのものと同様である)。長時間のトレンドは両者ともよく一致していると言ってよく、成層圏における火山性エアロゾルの中低緯度から高緯度への拡散は、数か月のスケールで考えるならよく行なわれているとみなすことができる(Iwasaka et al., 1995)。しかし、アラスカで観測されたこの値は短時間に大きく変動している点で、日本で観測されたものと異なっている。

比較的短時間のうちで、エアロゾルの積分後方散乱係数が大きく変化する原因は、後述するよう、このライダー基地が極渦の内側に入ったか外側に入ったことが最も大きい原因である。また、極渦の周縁部に特徴的な、極渦からの気塊の剥離現象も変動幅を大きくする原因になっていると思われる(Loewenstein et al., 1990; Schmidt et al., 1991; Bauer et al., 1994)。

3. 2 極渦の内と外での成層圏エアロゾル濃度分布

成層圏エアロゾルの収支を成層圏の不均一反応という観点から考えると、成層圏からエアロゾル状物質が対流圏へ運び去られることは、成層圏内で進行している不均一化学過程に甚大な影響をもたらしていると予想される。

極渦の内部の空気は、冷却にともなって次第に沈降する。このことが成層圏のエアロゾル状物質を対流圏へ運び去る有力なプロセスの一つと考えられてきた。また、寒冷化が個々のエアロゾル粒子の周辺にある気体を急速に凝結させ、サイズを大きくする。このような場合には、時として比較的短時間に成層圏から対流圏へ重力落下するような粒子が生まれることも考えられる。このことによってもエアロゾル物質が成層圏から運びだされる可能性がある。

冬期の極成層圏では、PSCs (Polar Stratospheric Clouds、極成層圏雲)と呼ばれるエアロゾルが生じることは、多くの研究によって知られている。このエアロゾルは、硝酸を凝結させている確率が高く、この種のエアロゾル物質の形成は成層圏の低NO_x状態を急速に形成するために、大きなオゾン消失を引き起こす要因となる。さらに、これらの粒子状物質が対流圏へ流失すれば低NO_x状態はさらに長時間にわたって持続することになり、オゾン消失の度合いを深める結果をもたらすであろう。

極渦は、さまざまな力学的な要因で形を変えたり移動したりする。南極に比べ北極に生じる極渦は蛇行あるいは移動の度合いが大きく、このことがエアロゾル濃度の分布あるいはオゾン消失過程を大きく変化させる。

図3.3aに示すものは、フェアバンクスのライダー基地が極渦の外に位置している時期に得られたエアロゾルの濃度分布である。同時期の日本におけるエアロゾル濃度分布と比較的類似した特徴をもっている。図3.3bにはその時の100HPa面の高度が示してある。フェアバンク上空を通過する空気塊は日本の北部を経由してきている可能性が高いことがわかる。図3.3cに示すものはライダー基地が極渦のやや内側に入ったかあるいは極渦の壁にきわめて近いとみなされる時の例である。図3.3dにはその観測日の100HPa面の高度分布を示した。エアロゾル層の上端高度がかなり低くなっている。このような傾向は、人工衛星によるエアロゾル分布の観測でも確認されており、極渦内の空気塊の冷却にともなう空気塊の沈降とみなされている(例えば、Kent et al., 1985; McCormick et al., 1983)。しかし、この図には、従来の衛星観測などでは指摘されなかった‘エアロゾル層の中心部分の異状な凹部分’が存在している。

最近、大気 N_2O の濃度変化の観測から、極渦の壁付近の底部で空気塊の剥離が活発に起きていることを示唆する結果が得られている。エアロゾル濃度の高度分布に見られる異状な形状も、そのような力学過程によって生じたものではないかと考えられる。すなわち、比較的エアロゾル濃度の高い空気塊と濃度の低い空気塊との交換が生じて、垂直方向の濃度分布に異常と感じさせるほどの凹みを形成したのではないかと(Iwasaka et al., 1996)。

剥離した空気塊は、急速に極渦から離れ中緯度へ運ばれる確率が高い。比較的エアロゾル濃度が高くしかもオゾン層の中心部分に近い高度の空気塊の中緯度帯への移動は、オゾン消失過程を考えるうえできわめて重要である。エアロゾル濃度の高い空気塊は、その空気塊のなかで不均一反応が活発に進行し得る可能性を示している。また、緯度の低い地域へ流出することはそれだけ太陽放射を浴びる時間が長くなることを意味し、もし気塊中の NO_x 濃度がエアロゾルの存在によって低下しているならば、その気塊のなかでは活性の高い ClO_x が生成しやすい環境になっているはずである。

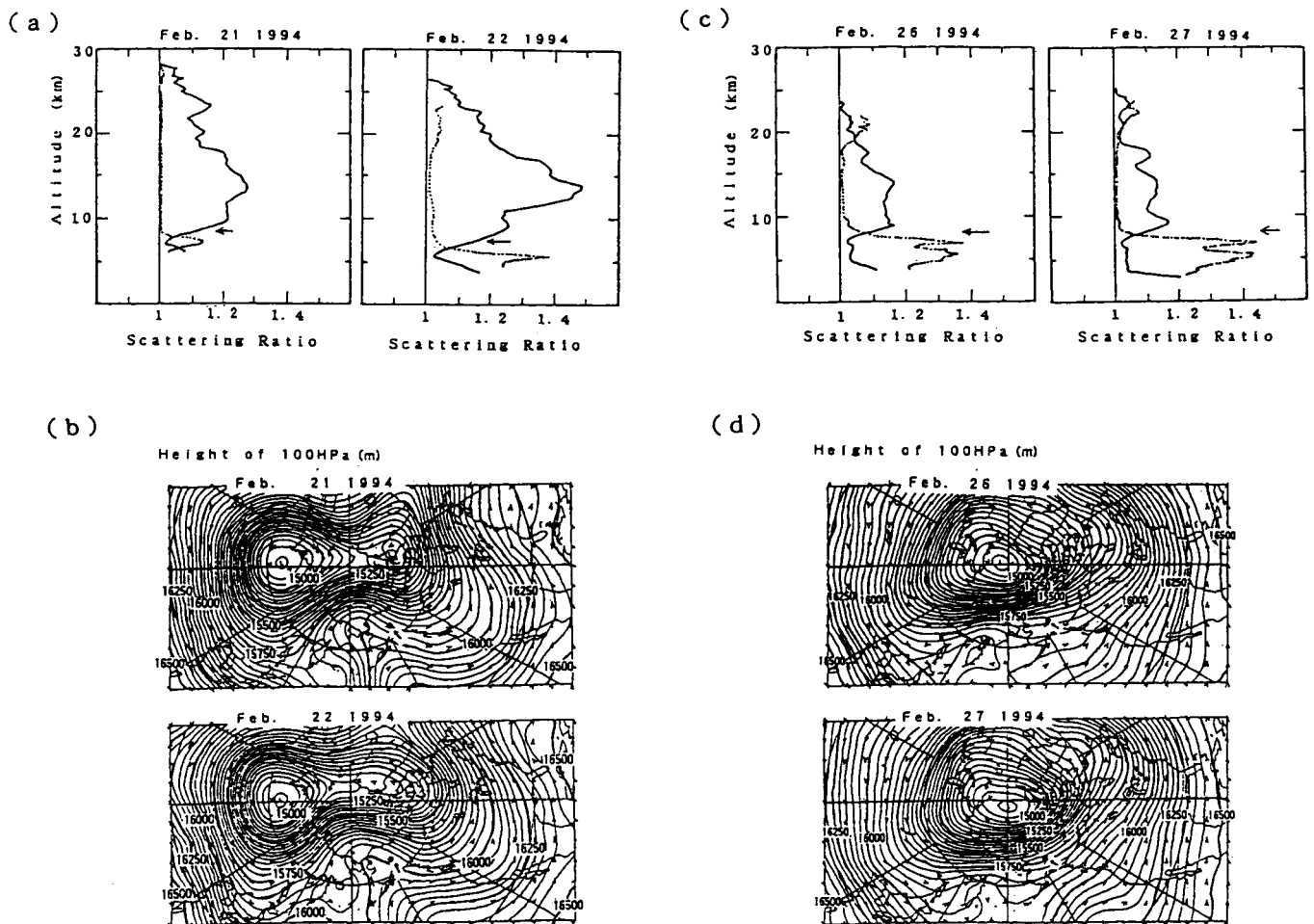


図3.3 アラスカのフェアバンクスで観測されたエアロゾルの散乱比と等圧面高度。

- a : 1994年2月21日および22日の観測。実線は散乱比、点線は偏光解消度を示す。
- b : 1994年2月21日および22日の100HPa面の高度分布。
- c : 1994年2月26日および27日の観測。実線は散乱比、点線は偏光解消度を示す。
- d : 1994年2月26日および27日の100HPa面の高度分布。

図3.4には、同じ時期のスピッツベルゲン（ノルウェー）での結果が示してある。この時期にはスピッツベルゲンのライダー基地は、極渦の内部にあり、典型的な極渦内部のエアロゾル濃度分布を示している。2月26日には高度17 km付近を中心に強い散乱比が認められその付近の偏光解消度も大きくなっている。典型的なPSCsである。翌日の2月27日には散乱比としては顕著なピークを示していないが、同様の高度に偏光解消度のピークが認められているのでこの高度に少量ながらもPSCsが存在している可能性を示している。

PSCs層の下に広がっているバックグランドエアロゾル層は、アラスカのそれと比べると明らかに下の方に押しつぶされたような印象をあたえ、極渦内で冷却にともなう空気塊の沈降が生じていることを伺わせている。また、アラスカで観測された2月21日夜22日の観測例とスピッツベルゲンで観測された2月27日の例をくらべると、エアロゾル層のピーク高度やエアロゾル層の上端部の高度が極渦内で3～5 km程度低下していることが推定される。

ここに示したライダーデータからは、個々の粒子の重力沈降が有ったのか無かったのか似ついでには議論できないが、水平方向の一様性がある程度保たれていることと仮定すると、スピッツベルゲンで観測されるような「対流圏界面直上の大きな散乱比」は、個々の粒子の落下もある程度の寄与していると考えてもおかしくない。

個々の粒子が重力落下する場合には、落下途中で蒸発消滅しないだけの低温状態がエアロゾル層下部にまで広がっている必要がある。このような温度条件のもとで落下する粒子は、下方へゆくにしたがって落下運動に対する空気の抗力が強くなるので、下方にエアロゾル物質が集積しやすくなる（Iwasaka and Hayashi, 1991）。非断熱的な空気塊の場合には、沈降の速さが高度によってどのように違うのか、極渦の内部ではほぼ一様に沈降しているのか、もしそうでないとするなどどのような差が見られるのかなど、によってその影響の出方が一様ではないと考えられる。

また、不均一反応という立場から考えると、個々のエアロゾル粒子の落下は一方では（エアロゾルの落下によって濃度が減少するエアロゾル層上端部では）エアロゾル物質が無くなることで生じる反応の低下と同時に、他方では（落下してくるエアロゾルが集積しやすいエアロゾル層の下端部では）これまでよりも多量のエアロゾル粒子が存在する状態が出現するために反応が強制的に促進する状態も生まれてくる。

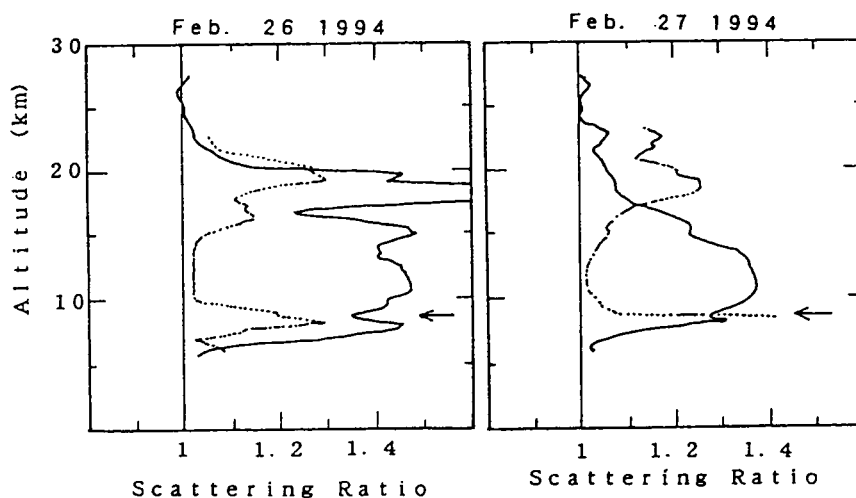


図3.4 スピッツベルゲン島で観測されたエアロゾルの散乱比。

1994年2月26日（右）、1994年2月26日（左）

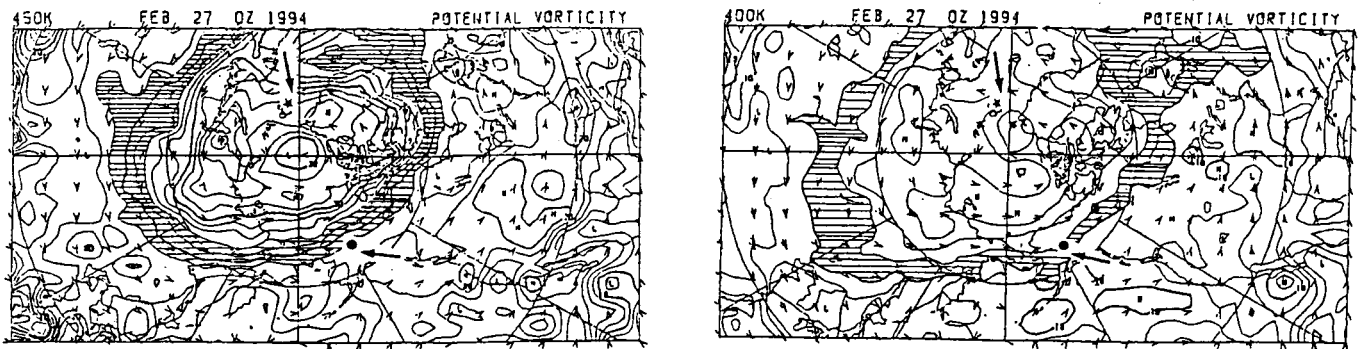


図3.5 1994年2月27日の等温位面上のポテンシャル渦度の分布。

450K面(左)、400K面(右)。●はフェアバンクス、★はスピッツベルゲンのライダー基地の場所を示している。

3.3 まとめ

アラスカなどで行なわれたライダー観測から、極渦内でのエアロゾル層の沈降、極渦周縁部における空気塊の混合(極渦からの気塊の剥離とそれとともなって生じる補償流)やそのともなう中緯度地帯への極の空気の拡散、などが一連の観測から明らかになった。

エアロゾル層中心部の剥離現象の存在は、極付近で生まれた空気が中緯度へ移動してゆくことによって生じるオゾン消失過程の研究調査が今後必要であることを示唆している。このためには、多数の観測点を有機的に結びつけたエアロゾルやオゾンなどの同時観測、人工衛星による多成分の同時広域観測が有効であると思われる。

極渦内部の空気塊の沈降にともなう「エアロゾル層の沈降」は、成層圏のエアロゾル物質の地球規模で考えた収支にすくなく影響を与えていると考えられ、このことを通して間接的にオゾン消失過程にも影響を与えていると考えられている。しかし、定量的な吟味をするだけの観測が蓄積されておらず今後の継続的な観測が望まれる。

個々のエアロゾル粒子の成長(PSCsの発生も含めて)に伴う重力落下現象の解明やその影響評価には、ライダーデータに加えて粒子サイズの直接的な観測データが必須である。本研究では、光散乱を利用したエアロゾルの粒径分布を計測する装置(レーザーパーティクルカウンター)を開発し試験的にスピッツベルゲンやヤクーツクで観測を試みた(詳しい報告はここでは略した)。

今後は、ライダーとの同時観測を行なって詳細な比較をとおして、エアロゾル粒子の成長・消滅および重力落下現象などについて新たな知見が得られると思われる。また、このような比較観測を極渦内部と周辺部で同じ時期に集中して実施することは、きわめて興味ある結果が期待できよう。

海外における観測では、観測基地を長期間維持するために多大な労力を必要とし、国によっては観測に対する制限条件が日本と大きく異なる場合も生じてくる。今後、継続的な観測が必要なものに対してはこれらの点をすみやかに解決するシステム作りも大きな課題となろう。

4. 北海道における成層圏エアロゾルのライダー観測

4. 1 目的

本研究の目的は、日本の最北端でオゾン減少の最も大きく現れ、冬期には数度極域内に起源を持つ気塊が通る北海道の稚内において、ライダー観測を行い、筑波やアラスカなどの他の地点におけるライダー観測と比較する事のできる成層圏エアロゾルの鉛直分布データを取得する事である。そのような比較から成層圏エアロゾル量、高度分布、中高緯度での水平分布と輸送に関するデータが得られる。また、母子里や札幌など北海道で得られる二酸化窒素観測やオゾン観測の結果と比較して、そこから成層圏で起きている物理・化学過程を解明する事も重要な研究課題である。稚内は冬期の晴天率が低く、観測日数が限られるため、冬期には釧路でもライダー観測を行い、北海道におけるエアロゾルの鉛直分布データが得られるようにした。

4. 2 観測装置

観測に用いているライダーシステムの諸元を表4.1、4.2に示す。稚内でのライダー観測は1991年8月に波長1.064 μm で開始し、その後1992年8月からは0.532 μm でも観測を行えるように機器を改良した。これによりエアロゾルの高度分布だけでなく粒径分布の情報も得られるようになった。さらに、1994年8月からは0.532 μm で偏向解消度の観測も行えるようにした。偏光解消度の測定により粒子の形態（液滴粒子と固体粒子の区別）についても情報が得られるようになった。釧路での観測は1994年12月から東北工大と協力して開始した。観測波長は0.532 μm で、1995年12月からは偏光観測も出来るようにした。

表4.1 稚内ライダーシステム

送信部		
Nd:YAGレーザー	基本波(1.064 μm)	
	600mJ/pulse	10Hz
Nd:YAGレーザー	第2高調波(0.532 μm)	
	180mJ/pulse	10Hz
	ビーム広がり	0.1mrad
受信部		
望遠鏡	ϕ 35 cm	シュミットカセグレン
	距離分解能	96m
	(0.532 μm	偏光観測)

表4.2 釧路ライダーシステム

送信部		
Nd:YAGレーザー	第2高調波(0.532 μm)	
	180mJ/pulse	10Hz
	ビーム広がり	0.1mrad
受信部		
望遠鏡	ϕ 28 cm	シュミットカセグレン
	距離分解能	96m
	(0.532 μm	偏光観測)

4. 3 観測結果

ピナツボ火山の噴火から4年以上が経過して火山噴火により成層圏に注入されたエアロゾルの中・長期的な消長が見えるようになってきた。図4.1には $1.064\ \mu\text{m}$ 、図4.2には $0.532\ \mu\text{m}$ における後方散乱比の高度分布を時間を追って示している。稚内での観測は1991年8月28日が最初で、このときは18 km付近にピナツボ起源と見られる小さなピークが見られた。10月に入ってからは20 kmより高い成分も観測されるようになり強度は激しい増減を繰り返しながら強くなり、11月22日に最大の後方散乱比を観測した。図4.3は1991年8月以来の後方散乱係数の積分値(IBC)を示している。1991年後半には火山雲の水平方向の不均一性からIBCは激しい変化を示しているが、1992年からは比較的落ちついた変化をしている。1993年からはIBCの減少傾向がはっきり見て取れる。特に、春から初夏に減少が顕著である。エアロゾルの平均高度と圏界面高度を図4.4に示しているが、この図から圏界面の季節変動に伴う変化とともに年ごとにエアロゾルが沈降して行っている様子がうかがえる。

図4.5には稚内での偏光観測結果の一例を示している。薄い雲のある5-8 kmと12 km付近では偏光解消度が高くなっており、雲が氷で出来ている事を示している。この日の圏界面高度は13 kmで、12 km付近のピークは13 kmから28 kmまでに広がっているエアロゾルとは偏光特性が全然違う事がわかる。13 kmから28 kmにあるエアロゾル層では逆にその近くの大気の偏光解消度に比べ偏光解消度が小さくなっており、成層圏エアロゾルが液滴から出来ている事を示している。

稚内は冬期の晴天率が低く観測日数が限られるので、冬季でも晴天率が高い釧路での観測を東北工大と協力して1994年12月から開始した。図4.6に1995年1月20日の稚内と釧路の観測結果を示している。エアロゾルの分布は2地点でよく似た傾向を示している。わが国の中で、北海道は極域との相互作用が観測される場所であり、特にその相互作用は冬期に起こり易いため、冬期の精密な観測を釧路でも行うことは重要である。

4. 4 考察

観測されたエアロゾル量から予測される二酸化窒素の減少量は1992年の春先で30%から50%にも及ぶが(Shibata, Itabe, Mizutani and Asai, 1994)、実際に稚内の近くの母子里で観測された二酸化窒素は平年に比べて半分近くまで減少した事が報告されている(Koike, Kondo, Matthews, Johnston and Yamazaki, 1993)。札幌におけるオゾン観測もピナツボ起源のエアロゾルが北海道で見られるようになってから、オゾンが平年に比べ減少している事を示しているが、その減少量は冬場から春先にかけてが特に激しく、1993年の冬から春先にかけては15%近い減少を示している。この減少傾向は1993年末にはかなり小さくなっている。また、オゾンの減少している高度も1992年から1994年にかけて低くなってきている。このようなオゾンの変化はライダーによって観測されたエアロゾルの変化によく対応している(Kondo, Zhao, Uchino, Nagai, Fujimoto, Itabe, Mizutani and Shibata, 1995)。二酸化窒素やオゾンの減少とエアロゾルの動態がよく対応した変化を示している事は、エアロゾル表面での不均一反応により最終的にはオゾンの破壊に進むプロセスが実際に働いている可能性を示している。

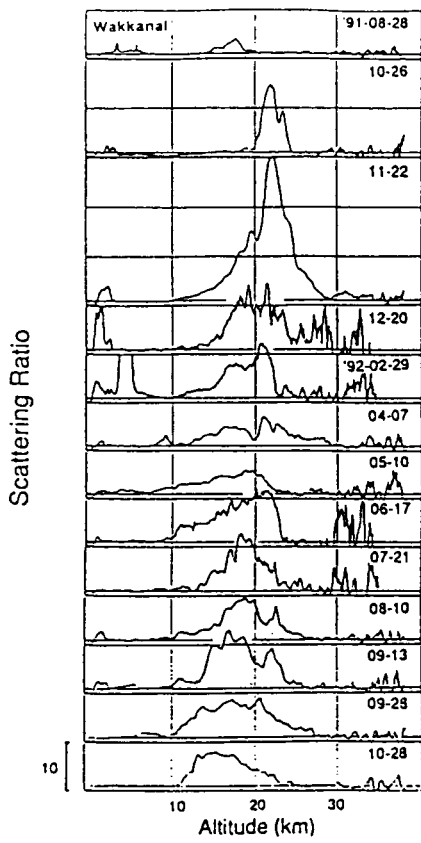


図4.1 稚内における1.064 μmでの散乱比の高度分布

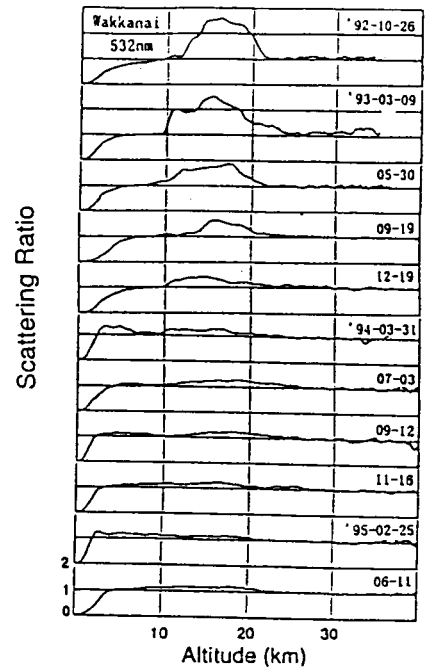
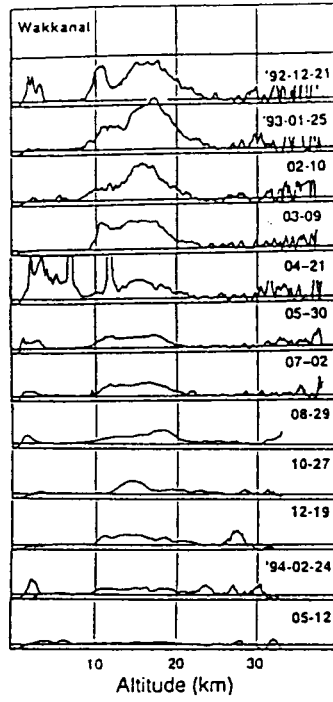


図4.2 稚内における0.532 μmでの散乱比の高度分布

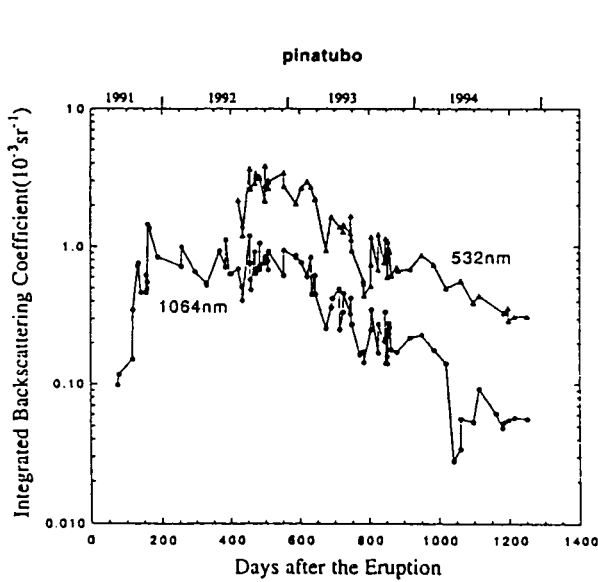


図4.3 稚内におけるIBCの時間変化

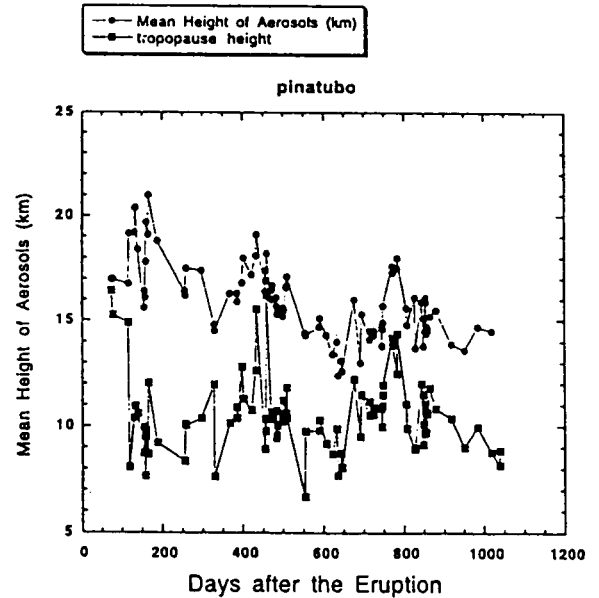


図4.4 稚内におけるエアロゾルの平均高度と圏界面高度の時間変化

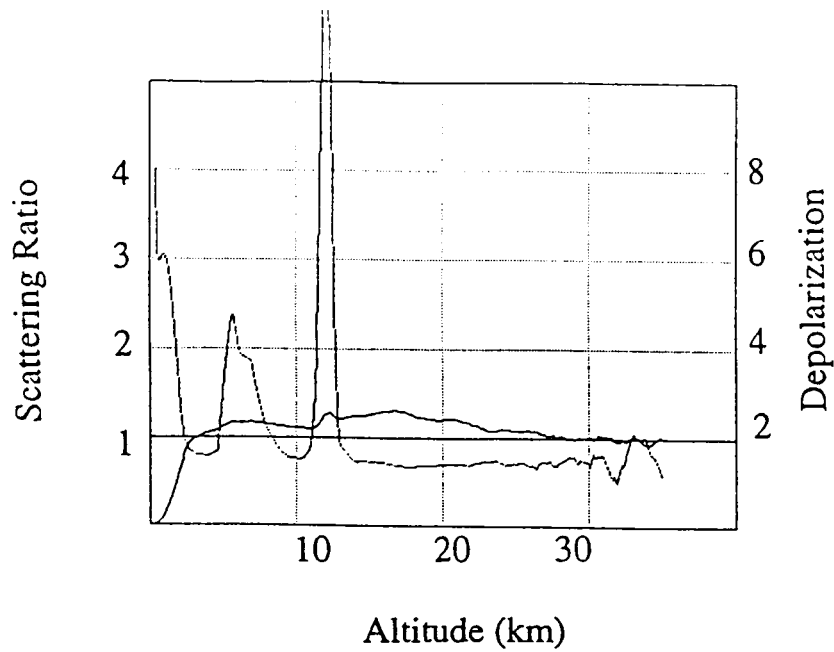


図4.5 1994年10月11日の稚内における散乱比（太線）と偏光解消度（細線）の高度分布

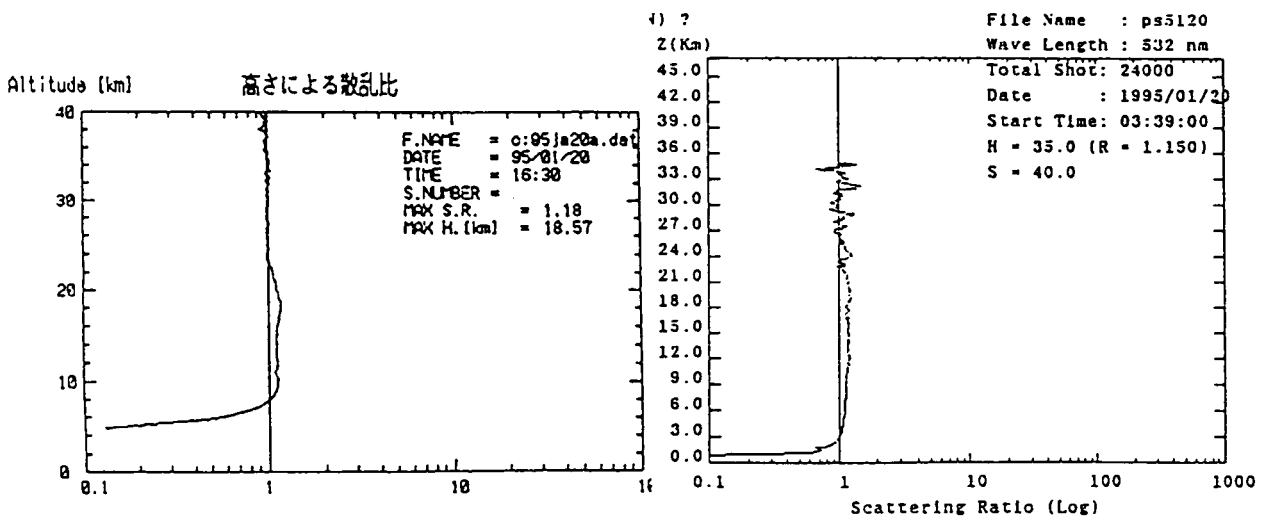


図4.6 1995年1月20日の鉦路（左図）と稚内（右図）における0.532 μmでの散乱比の高度分布

4.5 まとめ

成層圏エアロゾルの動態を明らかにし、成層圏エアロゾル表面での不均一反応とそのオゾン破壊への影響をしらべるために稚内において1991年8月から、鉦路においても1994年12月からライダー観測を開始した。ピナツボ火山噴火の影響は北海道においては1991年10月頃から顕著になり、1993年からは成層圏エアロゾルは減少傾向にある。エアロゾルの消長と、その表面での不均一反応により減少すると予想される二酸化窒素やオゾンの動向には相関があり、オゾン破壊機構に占める成層圏エアロゾルの重要性が示唆された。今後も北海道でのライダー観測を行うとともに、他の観測点でのデータや衛星データとの比較研究などもやっていきたい。

5. つくばにおけるオゾンゾンデ観測

気象庁高層気象台（つくば市）は、オゾンゾンデによるオゾンの高度分布の観測を1968年より開始し、オゾン層の長期変化傾向（トレンド）の調査に重要な観測データを提供してきた。現在は、毎週一回の観測が続けられている。オゾンの高度別の変化の様子を捉えるために、高層気象データの蓄積を有する同気象台において、このオゾンゾンデ観測を強化する追加の特別観測を実施した（平成7年度は12回）。

オゾン層のトレンドは、中高緯度地方において冬季～春季に減少傾向がみられることから、特別観測は各年ともこれらの季節に行われた。また平成7年度には、近年、北半球高緯度の冬季に顕著なオゾン層の減少すなわち極渦内のオゾン破壊の現象等を観測するため、課題内の各観測研究が観測日を同期する集中観測を行った（1996年1月～4月）。中緯度のつくばにおいても、高緯度のオゾン変動の観測データに対する対照データとしての位置付けから、この集中観測に加わった。なお、これら特別観測は、欧州を中心とした国際協同による観測キャンペーン（SESAMEやそれに続くキャンペーン）の一環としても行われた。

オゾンゾンデ特別観測も含めて得られた多数のオゾンの垂直分布のうち、図5.1(a)～(d)に1994年2月、1995年1月、2月、及び1996年2月の観測結果を示す。図中の太実線は1968年以來の月別累年平均値で、その他の線は個々の観測データである。図から、オゾンの垂直分布は観測地点や季節が同じでも日々大きく変化すること、特に高度約10kmから23kmにかけては大きな変動幅を持っていることがわかる。図5.1(b)の1995年1月の場合、高度によってはオゾン量の変動幅は100 μ mb以上になった。図5.2に1996年1～3月のオゾンの垂直分布の推移を示す。この図からも高度別のオゾン量の日々の変化が大きいことが判る。

今回の観測では、成層圏の極渦がつくばから遠く離れた高緯度地方に位置していたことから、つくば上空のオゾンの短期変動は、極渦内にあった大気の影響を直接受けていないと考えられる。例えば図5.2では、1月下旬と3月上旬に高度約8～18kmにかけて大きくオゾンが増加した。これらの場合は、図5.3に示す対流圏界面（最下層）の高度の推移とよく対応していることや、日本の東方海上で低気圧が発達して日本上空の圏界面付近では下降流が示唆されることから、オゾンの多い成層圏の空気が下層に降下した結果、この高度でオゾン量の増加が生じたと推測される。

短期的なオゾンの分布は特に約10～23kmの圏界面から下部成層圏にかけて大きく変動し、累年平均値の2倍以上に増加することもよくある。しかし、高度別のオゾントレンド（長期変化傾向）については、一般的に下部成層圏で減少、対流圏で増加の傾向があるといわれる。つくばにおける1976～1995年の20年間のデータを使ったトレンド解析では、約9～26kmで減少傾向、それより低高度及び高高度では増加傾向がみられ、特に、高度約19～26kmでは95%信頼限界を考慮しても減少トレンドが明らかだった（気象庁、1996）。図5.4に1994～96年の1月から3月のオゾン垂直分布の月平均値及びそれぞれの月の過去の平均分布を示す。図中の太実線は月平均値、細実線は1968年からの累年平均値であり、累年平均値からの偏差の程度の目安として累年平均値の $\pm 1\sigma$ （標準偏差）の幅を横線で表した。オゾンの高度別の分布は月平均値においても年々の変化が大きい。しかしながら、1994年1月の高度19km付近で明らかに過去の平均より多かったことを除けば、図5.4においても、やはり先に述べた19～26kmまたはその付近の高度のオゾンが過去の平均より少なかったことがわかる。特に1995年の1月には、この高度で標準偏差の幅を越えて累年平均値に比べて最大29%減少していた。また、高度24kmより上では、ほぼすべての月においてオゾンが過去の平均値に比べて多かった。

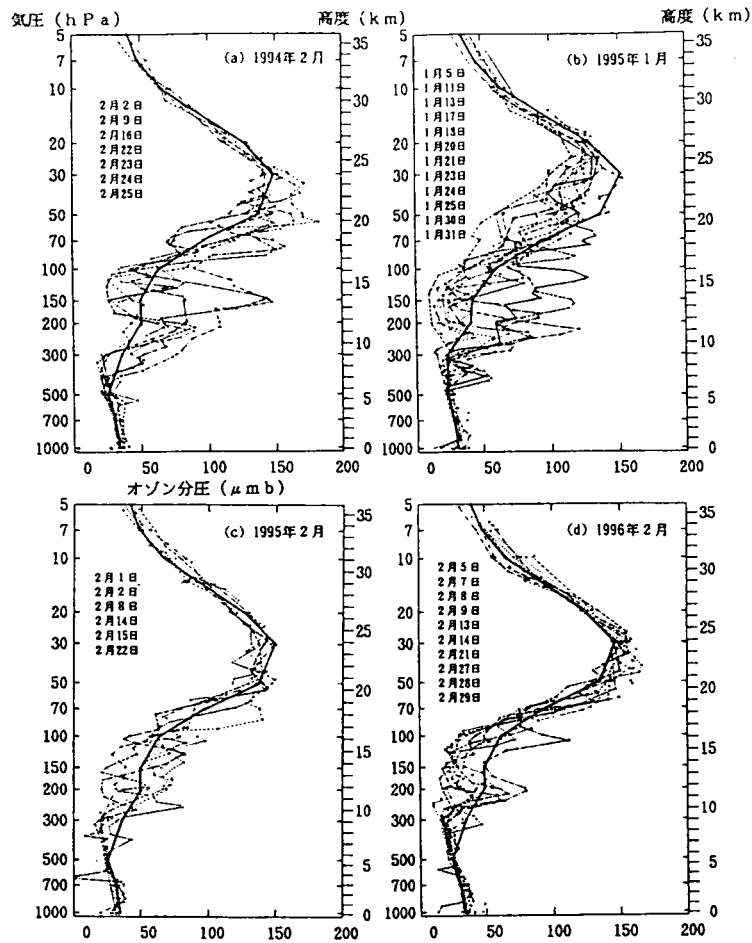


図5.1 つくばにおけるオゾンゾンデ観測結果 (a)1994年2月, (b)1995年1月, (c)1995年2月, (d)1996年2月の観測結果であり, 図中の太線は1968~93年の月別累年平均値, その他細線は個々の観測データを表す。オゾン分圧の単位は μmb (マイクロミリバール)。

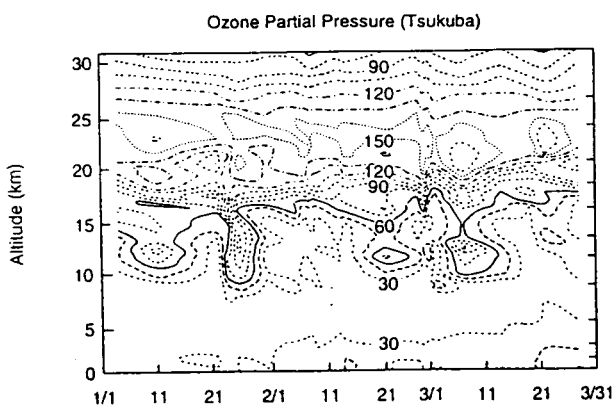


図5.2

図5.2 1996年1~3月のつくば上空のオゾン分布の推移 等値線は $15\mu\text{mb}$ 毎。

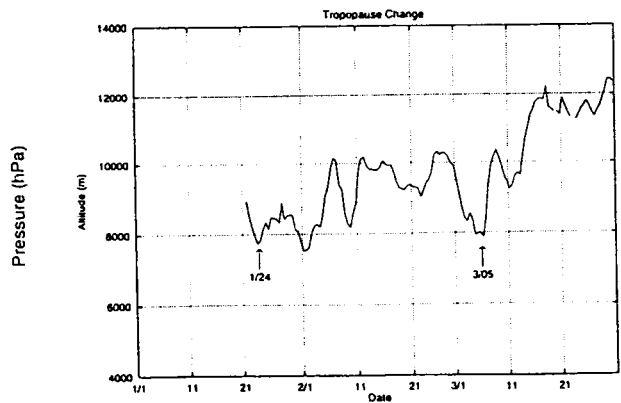


図5.3

図5.3 1996年1~3月のつくば上空の対流圏界面(最下層)の高度の推移

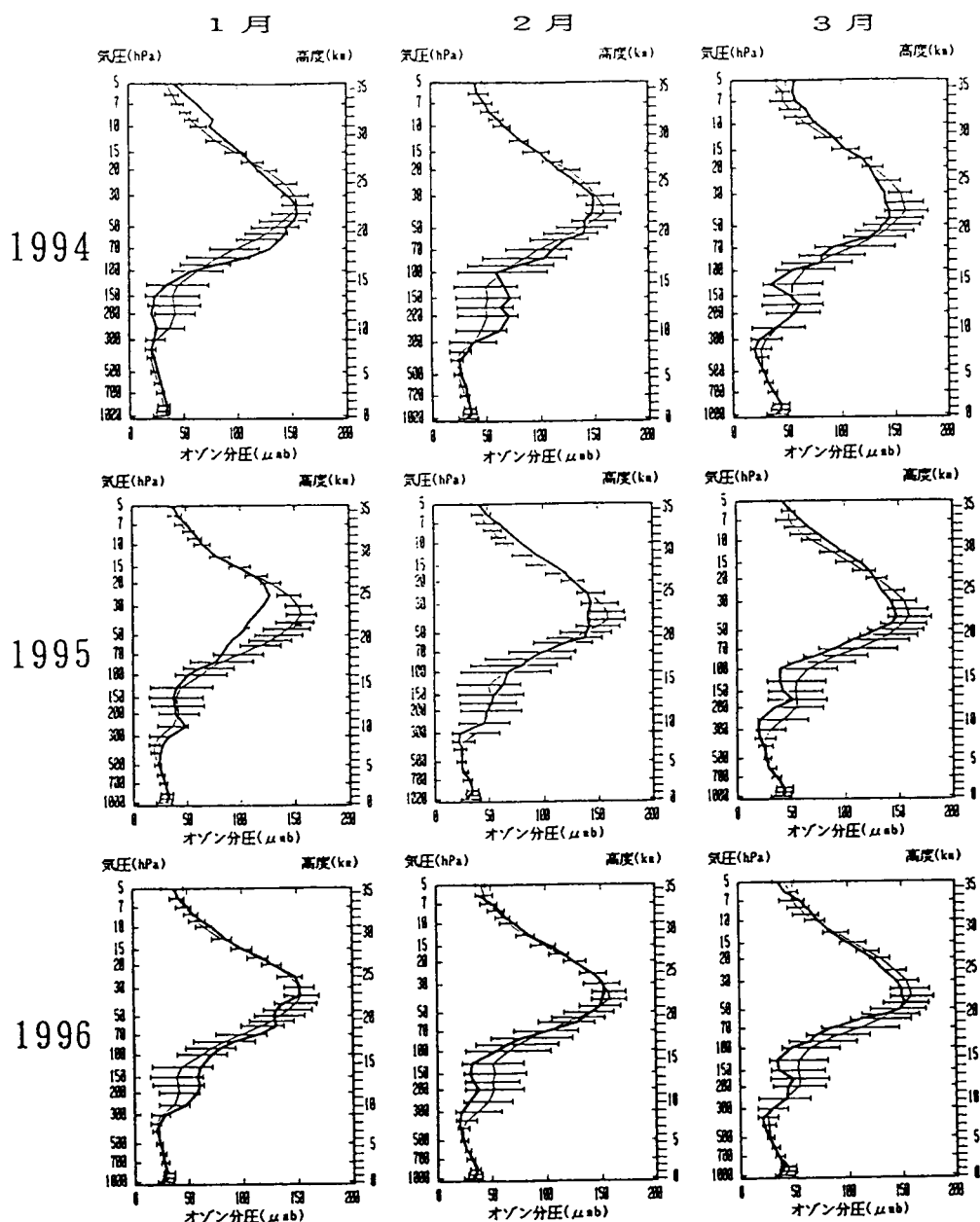


図5.4 つくば上空のオゾン高度分布の月平均値 太実線は1994~96年の1月から3月の月平均値，細実線は累年平均値，横棒は累年平均値の標準偏差。

6. 北海道母子里観測所におけるオゾンゾンデ観測

SESAMEにおいて、オゾンゾンデ観測された気塊の輸送経路（トラジェクトリー）の予報とそれに基づくオゾンゾンデの組織的観測による、化学的なオゾン減少速度の検出の試みが大きな成果をあげた（Rex et al., 1996）。この手法をより系統的に実施し、オゾン層破壊の実態と年毎の推移を明らかにするために、Ozone Sounding as a tool for Detection of Ozone Change (OSDOC) というプロジェクトが欧州を中心に、1995/1996年の冬季に開始された。北海道は、欧州からの気塊が通過し易いこと、オゾンが破壊されるために必要な日照時間が、欧州から気塊が到達する間に十分に確保されること、極渦の影響を受けやすいことにより戦略的に重要な観測地点である。しかしながら、北海道にはオゾンゾンデによって、数カ月にわたって柔軟に研究観測を行うことのできる施設が存在しなかった。そこで、本研究では、名古屋大学太陽地球環境研究所母子里観測所においてオゾンゾンデ観測を試みた。また、欧州のオゾンゾンデとの比較を容易にすること、

気象観測を妨害しないことを考慮し、欧州、米国で標準的に使用されているECCオゾンゾンデを用いた。また、少人数で観測できるように、追尾の不用な無指向性のアンテナを備えたヴァイサラ社の受信システムPC-CORAを用いた。

観測は1996年1月16日から実施され、4月26日までに、本研究による観測と太陽地球環境研究所独自の観測を合わせて、29回実施された。本年度は必要な要員全員の常駐は不可能であったため、集中観測期間に観測を集中させたが、平成8年度以降は任意の日時に観測を行う体制が整う予定である。特に、2月8日からの13日の気象研究所の赤外分光計による航空機観測に同期して観測できたこと、極渦が北海道に到達した4月14日から23日の期間に観測を行うことができたことは大きな成果である。観測結果は現在解析中である。

7. 東シベリアにおけるオゾン及び成層圏エアロゾルの観測

欧州を中心とした国際的集中観測、Second European Stratospheric Arctic and Mid-latitude Experiment (SESAME) の一環として、東シベリアのヤクーツク (62N, 130E) において、1995年1月～3月の間に、気球を用いたエアロゾルとオゾン高度分布の観測を4回行った。この結果及び解析は、サブテーマ4において報告する。また、1995年10月及び11月にもオゾンゾンデ観測を10回行い、東シベリアの秋期におけるオゾン鉛直分布の変動の一端を初めて明らかにした (図7.1)。

8. 本研究の成果と今後の課題

本研究では、国際集中観測プロジェクトSESAME(1994/1995)及びOSDOC(1995/1996)の期間を含めた3年間、北緯36度から78.5度の間のそれぞれ特徴を持った5地点でエアロゾルやオゾンの観測を実施し、各地域に特徴的なオゾン及びエアロゾル高度分布の観測例を得ることができた。今後、SESAMEで得られた多くのデータを参考にして、上に見られるような観測結果の背景となっている変動機構を明らかにする。また、日本国内、特に北海道における観測データを積み重ね、日本上空のオゾン層変動と極渦の関係について更に解明して行くことが必要である。

国際共同研究などの状況

アラスカでのライダー観測は、アラスカ大学地球物理研究所との共同研究として実施されている。スピッツベルゲンにおける観測はアルフレッドウェーゲナー北極南極研究所(独)との、ヤクーツクにおける観測はロシア中央大気観測所(CAO)との共同研究として行われている。今冬のSESAMEに関連した観測研究は、日本-EU研究協力の一環として行われた。

引用文献

Koike, M., Y. Kondo, W. A. Matthews, P. V. Johnston and K. Yamazaki (1993):

Geophysical Research Letters, Vol. 20, p1975.

Kondo, Y., Y. Zhao, O. Uchino, T. Nagai, T. Fujimoto, T. Itabe, K. Mizutani and T. Shibata

(1995): Geophysical Research Letters, Vol. 22, p3223.

Shibata, T., T. Itabe, K. Mizutani and K. Asai (1994):

Geophysical Research Letters, Vol. 21, p197.

研究発表の状況

研究発表の状況

誌上発表(○印は査読誌)

- Iwasaka, Y., M. Fujiwara, K. Matsunaga, M. Nagatani, H. Nakada, I. Mori, T. Ojio, E. Akiyoshi, S. Yasumatsu, and K. Kondoh, Lidar measurements of stratospheric aerosols enhanced after the eruption of Mt. Pinatubo: Alaska, winter 1991/1992. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., 7, 83-89, 1993.
- Iwasaka, Y., M. Hayashi, T. Shibata, K. Matsunaga, M. Nagatani, H. Nakada, I. Mori, T. Ojio, M. Fujiwara, E. Akiyoshi, S. Yasumatsu, K. Yamazaki, K. Kondoh, and H. Nakane (1994), Transport of Pinatubo aerosols to the arctic region: Lidar measurements in Alaska, winter 1991/1992. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., 8, 27-33.
- Iwasaka, Y., M. Hayashi, T. Shibata, M. Nagatani, H. Nakada, T. Ojio, H. Adachi, K. Matsunaga, K. Osada, I. Mori, M. Fujiwara, E. Akiyoshi, K. Shiraishi, K. Yamazaki, K. Kondoh, and H. Nakane (1995), Lidar measurements in Alaska, 1991-1994 -Pinatubo volcanic effect on stratospheric aerosol layer-, Rev. Laser Engin., 23, 166-170.
- Iwasaka, Y., T. Shibata, H. Adachi, T. Sakai, M. Fujiwara, K. Shiraishi, K. M. -Kondoh, and H. Nakane (1996), Polar vortex meandering and stratospheric aerosol distribution: Lidar measurements at Fairbanks, Alaska, J. Geomag. Geoelectr. (to be published)
- Y. Iwasaka, M. Hayashi, T. Shibata, K. Katsuji j, M. Nagatani, H. Nakada, I. Morl, T. Ojio, M. Fuijwara, H. Akiyoshi, S. Yasumatsu, K. Yamazaki, K. Kondoh and H. Nakane: Transport of Pinatubo aerosols to the Arctic region:Lidar measurements in Alaska, winter 1991/1992, Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol.Glaciol., 8, 27-33, 1994
- Y. Iwasaka, T. Shibata, M. Hayashi, M. Nagatani, H. Nakada, T. Ojio, M. Fui jwara, H. Akiyoshi, K. Shiraishi, K. Yamazaki, K. Kondoh and H. Nakane: Lidar measurements at Alaska, 1991-1994 -Pinatubo Volcanic Effect on Stratospheric Aerosol Layer-, The Review of Laser Engineering, 21, 166-170, 1995
- Y. Iwasaka, T. Shibata, H. Adachi, T. Ojio, M. Fui jwara, K. Shiraishi, K. Miyagawa-Kondoh and H. Nakane: Polar vortex meandering and stratospheric aerosol distribution: lidar measurements at Alaska, submitted to J.G.G.
- Kondo, Y., Y. Zhao, O. Uchino, T. Nagai, T. Fujimoto, T. Itabe, K. Mizutani and T. Shibata (1995):Geophysical Research Letters, Vol.22, p3223.
- Shibata, T., T. Itabe, K. Mizutani and K. Asai (1994):Geophysical Research Letters, Vol. 21, p197.

- Nakane, H., H. Akiyoshi, I Matsui, N. Sugimoto, Y. Iwasaka, M. Hayashi, T. Itabe, K. Mizutani, T. Uekubo, K. Matsubara, T. Kotake, H. Fukunishi, V. Yushkov, V. Dorokhov and V. Khattatov(1995): variation of ozone and aerosols in Eastern Asia during SESAME. European Commission Air pollution reserch report 56, Proceedings of the 3rd European workshop, 18 to 22 September 1995, Schliersee, Germany, 492-497
- Dorokhov, V., V. Khattatov, T. Potapova, V. Yushkov, I. Zaitcev, F. Goutail, J.-P. Pommereau, A. Sarkissian, H. Nakane, T. Ogawa (1996): Ozone monitoring in Eastern Siberia in 1994/1995. submitted to J. Atmos. Chem.
- Dorokhov, V., V. Khattatov, V. Yushkov, I. Zaitcev, H. Nakane, T. Ogawa (1996): Evidence of ozone depletion over Yakutsk, Eastern Siberia. submitted to J. Atmos. Chem.