

# 偏光ミーライダーシステムによる対流圏 エアロゾルの観測結果及び絶対量評価

柳井健宏\*\* 高尾和也\* 香川直己\*

Atmospheric Aerosol Observation of Polarized Mie LIDAR and  
Absolute Quantity Computation

Takehiro YANAI, Kazuya TAKAO, Naoki KAGAWA

## ABSTRACT

Observation of aerosols in 2002 at Fukuyama University with a polarized Mie LIDAR system is described. Location of the LIDAR system is 133.23/34.47N. In this report, we show a result from April 08 to 13 of 2002, under significant KOSA event, and another result from September 02 to 06, which was first data obtained automatically. The extinction coefficient was also predicted by using the volume particle size distribution and optical depth monitored by sky radiometer.

キーワード：ライダー，スカイラジオメータ，黄砂，消散係数

**Keywords:** LIDAR, Sky radiometer, KOSA, Extinction coefficient

## 1. まえがき

近年世界規模での環境問題が深刻になってきている。そのため、環境問題に対する関心は年々高まっている。その問題を解決するために時間的、空間的な環境状態のパラメータを精度よく計測する手法が必要である。

レーザ・レーダは別名ライダーと呼ばれ、レーザ光の短いパルスを地上或いは上空から大気中に射出し、大気から反射された微弱光を測定するものである。このようにして得られたデータを解析することにより、大気密度、雲、風速、気温、微量物質の濃度・速度・組織等、人類にとって重要な地球を取り巻く大気状態を明らかにすることが可能である。

ライダー手法には測定に使用するレーザと大気との相互作用の種類による様々な種類があり、ミー散乱を利用するミー散乱ライダー、色素レーザやエキシマレーザを用いた差分吸収ライダー、ヘテロダイン検波を用いたコヒーレントライダー、炭酸ガスレーザを光源とす

る風向風速用のドップラーライダー、ラマン散乱を用いたラマンライダー、レイリー散乱を用いたレイリー散乱ライダーなどがある。

現在エアロゾルに対する観測計画の内、東アジア地域を対象とした国際プロジェクト(ACE-ASIA)が進行中であり、日本では、仙台、筑波、長野、東京、名古屋、岡山、長崎でライダーによる黄砂観測が行なわれている。これらの観測地をネットワークで結び、観測情報を共有することにより、黄砂の動向を大きな地理的スケールで観測している。

我々は、瀬戸内地域の信頼性の高いライダーサイトを運営し、大気エアロゾルの振る舞いを把握するため偏光解消度が測定可能なミー散乱ライダー(ここでは偏光ミーライダーと呼ぶことにする)を用いて観測を行っている。

本稿では、2002年の4月の連続観測及び9月の自動観測、スカイラジオメータを用いた体積粒径分布及び消散係数について述べる。

## 2. 偏光ミーライダー及び周辺観測機器

### 2.1 偏光ミーライダー

我々の偏光ミーライダーは、Nd-YAG レーザの第2 高調波(532nm)を光源とし、出射光を大気中に垂直に打ち出し、上空の物体や微粒子による散乱光をシュミット・カセグレン望遠鏡で集光する。背景光を干渉フィルタで除去して、光電子増倍管(PMT)で電気信号に変換する。受信信号の時間波形から物体や微粒子の位置情報を、信号の大きさから物体や微粒子の大きさや密度を信号処理部で抽出し、デジタルオシロスコープで表示している。

このシステムの仕様を表1に示す。出射パワーは30mJ、繰り返し周波数10Hzで7分間出射する。

### 2.2 スカイラジオメータ

図1に本学3号館屋上に設置されているスカイラジオメータを示す。スカイラジオメータは太陽からの直達光及びその周辺光の分光強度を計測する装置である。可変波長フィルタを内蔵し、7種類の波長を分光計測し、それらの波長に感応する大気的光学的厚さをエアマスク値に応じて自動計測する。太陽を光源とするため、昼間のみの観測となり、悪天候の場合は鏡筒を保護するため自動的に計測を中止する。また、この観測データを分析することにより大気中微粒子の粒径分布を推定することができる。このスカイラジオメータの観測データは消散係数対後方散乱係数比(以下ライダー比)  $S_1$  を推定するとき用いる。これらの解析には東京大

学気候システム研究センターの中島映至教授によって作成されたスカイラジオメータ解析用プログラムパッケージ[2]を用いた。

スカイラジオメータは鏡筒、サンセンサー、太陽追尾装置、雨センサーで構成されている。鏡筒は光学系、フォトダイオード、増幅回路、A/D変換回路で構成されている。太陽追尾装置はモータなどの駆動系部と制御系部で構成されており、太陽を追尾する。その制御系部は制御回路、通信回路、CPUで構成されており、鏡筒、サンセンサー駆動系部、雨センサーの制御を行なう。

### 2.3 マイクロ波レーダ

ライダー観測には雨滴による強い後方散乱は危険である。また、光学機器も水滴に弱い。更に、ライダー出射光は最大許容露光量から試算される安全基準を満たしているが、低空を飛行する小型機やヘリコプターなどの航空機に照射することを極力避けるためにマイクロ波レーダで監視し、航空機が近づきすぎるとレーザを停止する必要がある。そのため、マイクロ波レーダを設置した。この装置は低層大気の広角的な計測を行なうことができるため、対流圏内の雲など、低層大気の計測データを得ることを目的としている。レーダアンテナは、最大仰角40°になるように改良を加え、仰角27.5°で、図1に示すように3号館屋上に設置されている。測定レンジは20km以上に設定し、最低高度約5.2kmから最高高度13kmまでの垂直レンジが得られる。水平方向は10kmの観測レンジを持つ。

図2に雨の時のレーダ画像、図3に航空機飛来時のレーダ画像を示す。画像はWebカメラで中継され、各オペレータのデスクトップからHPを介してリアルタイムに監視することが可能である。

## 3. 対流圏エアロゾル観測

### 3.1 観測結果

2002年4月8日から13日に手動による連続観測を行った。観測期間中の天候を表2に示す[3]。図4に観測結果を示す。図中の空白は夜間、雨等で計測できなかった時間帯である。上が後方散乱光強度、下が偏光解消度を表わしている。偏光解消度は非球形物質の割合を表わし、後方散乱光強度はエアロゾル全体の濃度に対応する。また、図5に同期間のスカイラジオメータ観測データから得られた体積粒径分布を示す。縦軸は体積、横軸は粒径を表わしている。

4月9日から10日にかけて、高度2km付近で、偏光解消度が20%を越え、後方散乱光強度も高い値を示している。このことから、非球形の物質が多く存在したと推定できる。12日の結果は後方散乱光強度に反応が見られるが、偏光解消度は20%未満である。また、表2からこの日は曇天であったことがわかり、雲を構成する水滴

表1 偏光ミーライダーの性能諸元  
Table1 The specification of Mie LIDAR.

Transmitter	
Laser	Nd-YAG
Wave Length	532nm(SHG)
Energy/Pulse	245mJ(max.)
Repetition	10Hz
Beam Diameter	9.5nm
Pulse Length	7-8ns
Receiver	
Telescope	Schmidt
Area	0.38m <sup>2</sup>
Detector	PMT
Signal	8bit A/D

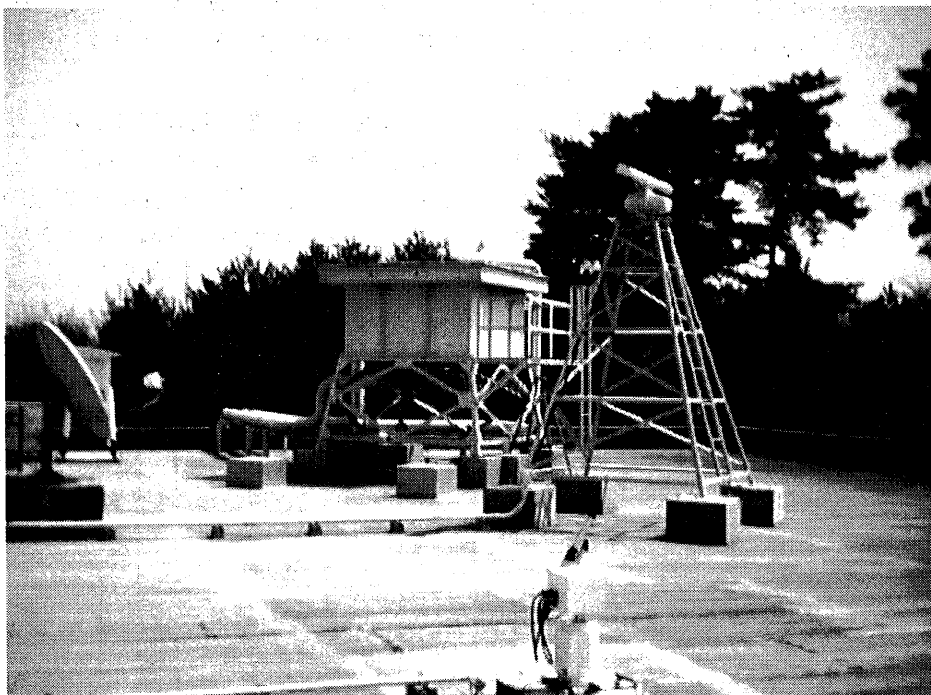


図1 3号館(電子・電気工学科)屋上に設置されたスカイラジオメータ(手前)及びマイクロ波レーダアンテナ(右奥)

Fig.1 Sky radiometer and a microwave radar antenna on the roof of Electronic and electrical engineering's building.

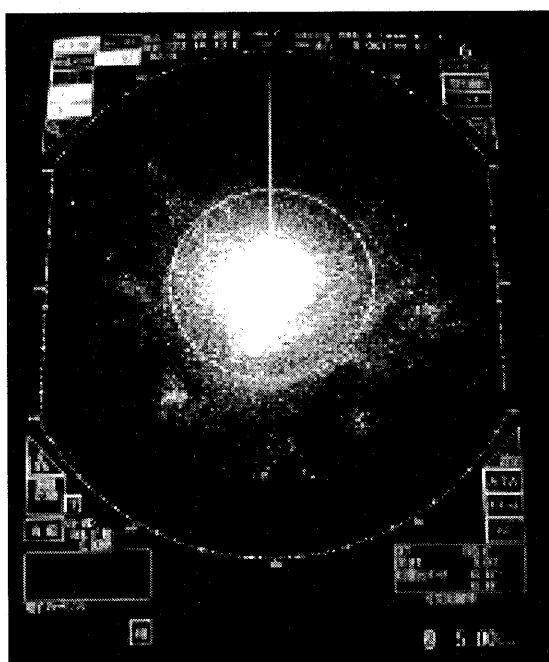


図2 降雨時のレーダ画像  
Fig.2 Observed radar echo of rain.



図3 航空機飛来時のレーダ画像  
Fig.3 Observed radar echo of airplanes.

による反応を示すものであると考えられる。

また、ライダー観測期間中のスカイラジオメータの観測結果に基づき算出した体積粒径分布から、この期間中には大別して数十 $\mu\text{m}$ と数 $\mu\text{m}$ の粒径をもつ2種類のエアロゾルが存在していたと考えられる。この結果とライダーデータの比較を行なうと、偏光解消度と数 $\mu\text{m}$ の粒径を持つエアロゾルの体積との間に相関が見られる。特に黄砂現象が認められた9日から10日はその傾向が顕著に表れている。このことから、黄砂現象が観測されている状況は数 $\mu\text{m}$ オーダーの粒子径を持つ非球形粒子、即ち砂礫が地表付近に降下した場合であると言える。一方、数十 $\mu\text{m}$ オーダーの粒子は黄砂現象には関係なくライダー観測期間中に常に存在していたことがわかる。従って、この大きさのエアロゾルは地表に接近することなく上空を通過するものと推定できる。また、11日のように降雨の直前には、大きな粒

子の割合が多く、偏光解消度の高いエアロゾルが局在していることがわかる。このことから、黄砂が確認された後に砂礫を核とした雨雲が発生し、これに起因した降雨が発生したと推定でき、黄砂現象と天候の関連性を示唆していると言える。

### 3.2 気温を用いた大気エアロゾルの状態判別

高度が100m上昇する毎に、温度が約 $0.5^{\circ}\text{C}$ 下がることを利用して、地表付近の気温から気温が $0^{\circ}\text{C}$ になる高度を推定し、その高度分布を偏光解消度や後方散乱光強度に重ね合わせることで、物質や微粒子の状態を推定した。即ち、高い偏光解消度を示すエアロゾルが気温 $0^{\circ}\text{C}$ の高度よりも下方に認められる場合は、エアロゾルの主成分は砂礫であり、その高度より上方に存在する場合は、氷および砂礫であると判断するものである。

図6に顕著な黄砂現象が認められた2002年4月10日のライダー観測データに気温 $0^{\circ}\text{C}$ の高度分布を重ねた結

表2 観測期間中の天候  
Table2 The weather charts from April 8 to April 13 of 2002.

月 日	4 / 8		4 / 9		4 / 10		4 / 11		4 / 12		4 / 13	
	午前	午後	午前	午後	午前	午後	午前	午後	午前	午後	午前	午後
天 候	霧	晴れ	曇り	晴れ	曇り	曇り	曇り	雨	快晴	快晴	曇り	快晴
最高気温 / 最低気温	21.5 / 14.2		18.7 / 9.8		16.8 / 7.5		15 / 8.8		17.5 / 7.3		20.6 / 8.3	

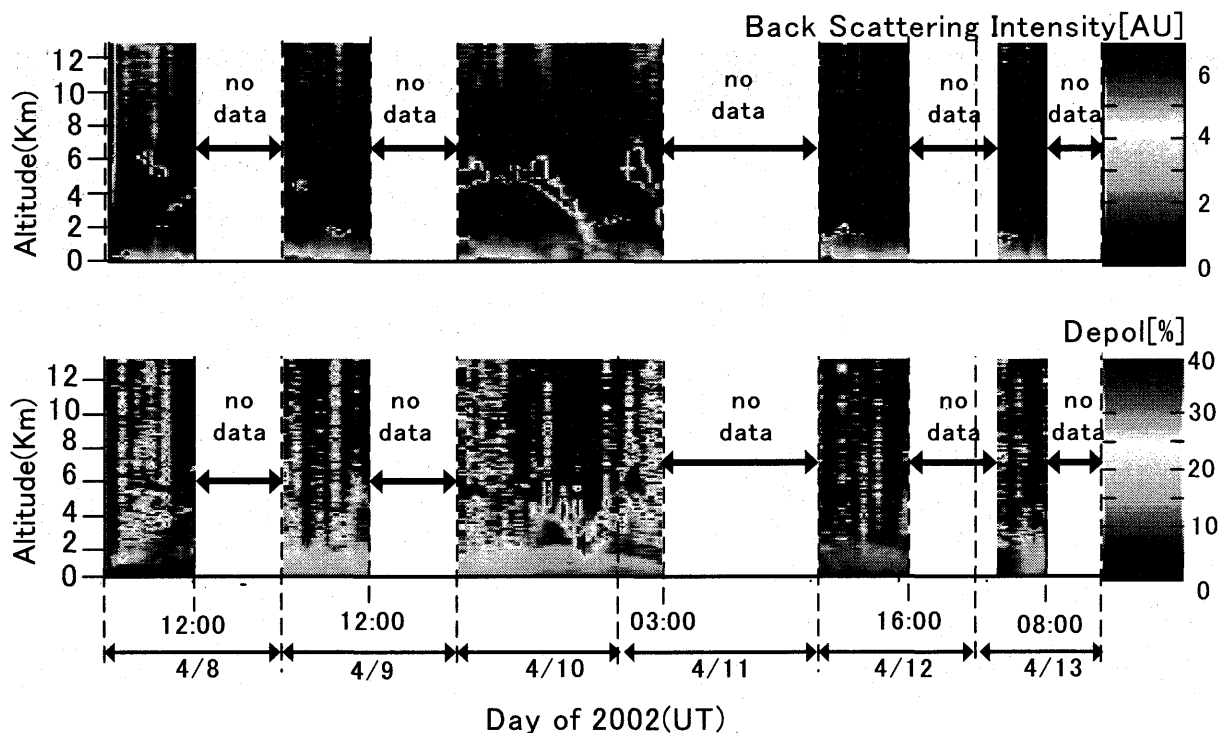


図4 2002年4月8日から13日までの連続観測結果  
Fig.4 LIDAR observation from April 8 to 13 April of 2002.

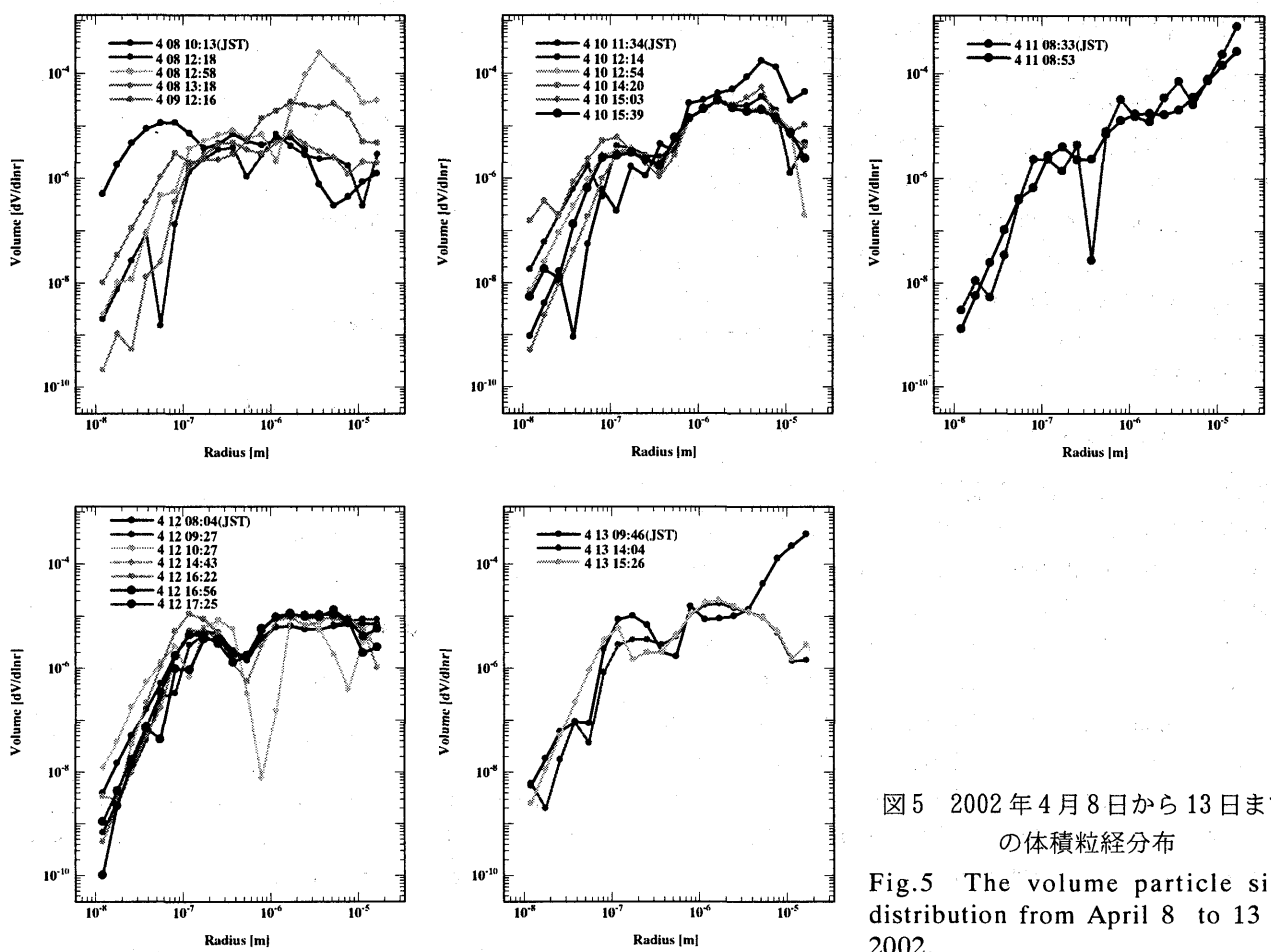


図5 2002年4月8日から13日まで  
の体積粒径分布

Fig.5 The volume particle size distribution from April 8 to 13 of 2002.

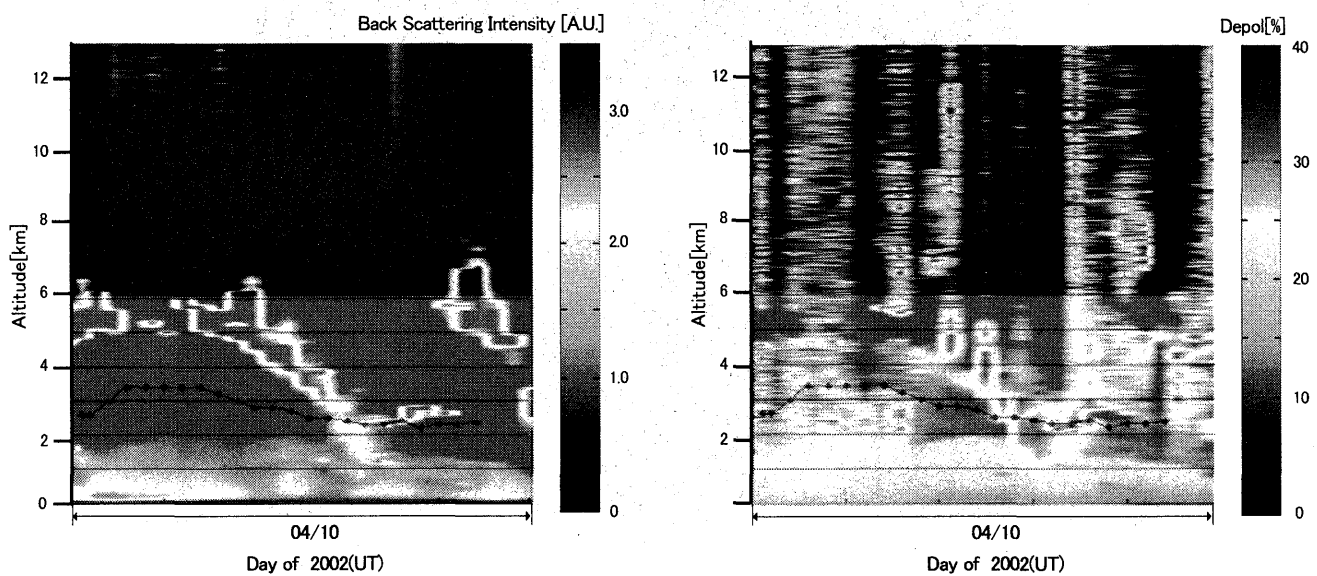


図6 2002年4月10日のライダー観測データと気温0°Cの高度分布曲線

Fig.6 LIDAR observed results with the zero degree centigrade altitude curve on April 10 of 2002.

果を示す．図中の青線が気温0℃の高度を示す曲線である．高度曲線を後方散乱光強度に重ねた結果を左に，偏光解消度に重ねたものを右に示している．この日は気温0℃の高度は3kmから2kmに分布しており，この高度曲線より下方にあり，かつ，偏光解消度が20%を超える値を示す物質は黄砂を構成する砂礫であると判断できる．一方，偏光解消度が20%から30%の高い値を示し，気温0℃の高度曲線よりも上方にある物質は氷塊もしくは砂礫であると推測されるが，3.1節での推定の如く，天候データも含めて考察すると，氷塊を含む雨雲であると考えることができる．

#### 4. システムの自動化及び結果

2002年6月まで手動で観測を行っていた．しかし，手動観測では，作業ミスが発生しやすく，人的負担が大きい．これらの問題を解消するため，ライダーの自動観測システムの構築を行なった．ライダーシステムは，図7に示すフローチャートによって，完全に自動制御される．このプログラムはG言語と称されるLabVIEW(National Instruments)で記述されている．図8に2002年9月2日～6日までの自動観測結果を示す．図8上は後方散乱光強度，下は偏光解消度を示している．測定開始日時は9月2日午前9時(JST)で，測定間隔は15分毎，24時間の5日間である．

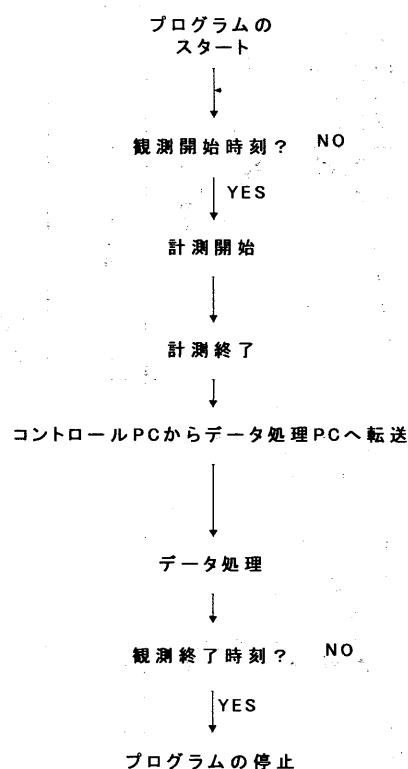


図7 自動測定プログラムのフローチャート  
Fig.7 Flow chart of the automatic measurement program.

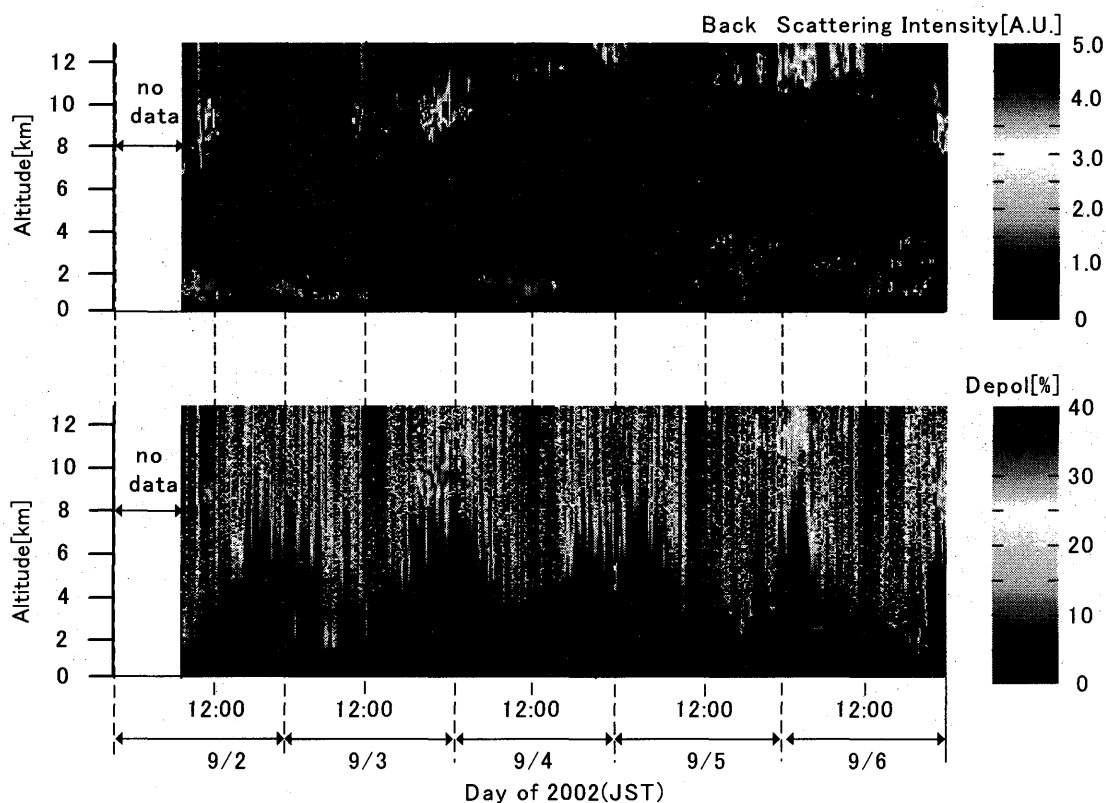


図8 2002年9月2日～6日の連続自動観測結果  
Fig. 8 Automatically observed data Sep. 2-6 2002.

図より9月3日の後方散乱光強度の高度8km以上に偏光解消度が15～20%を示す物質が断続的に表れている。これは巻雲と呼ばれ、氷の結晶からなる雲であると考えられる。この雲は低層に存在していた水分子が、上昇気流により対流圏上部に巻き上げられ、急激に冷却されることによって発生することが知られている。9月3日から4日、9月5日から6日にかけては成層圏に近い高度10km以上に巻雲が確認されている。これは地表温度が高く、対流も活発であったことにより、短い時間で極めて高い高度まで水分子が到達していたためであると予測できる。

このように、自動観測をすることにより、作業効率の向上や人的負担が軽減でき、詳細な大気エアロゾルの経時変化をリアルタイムに把握することができる。

## 5 ライダー観測データを用いた絶対量評価

ライダー観測データを用いたエアロゾルの定量的評価には消散係数を求めなければならない。消散係数とは、光の強度が、大気中の分子やエアロゾル粒子によって吸収および散乱し、減衰する割合を表わしたものである。消散係数の推定法として種々のものが提案されているが、我々は散乱ライダー方程式の解析法として広く用いられているFernaldの解析法で推定している。この解析法を式(1)に示す。

$$\sigma_1(r) = -\frac{S_1}{S_2}\sigma_2(r) + \frac{X(r)\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right)\int_{r_0}^r\sigma_2(r')dr'\right]}{\frac{X(r_0)}{\sigma_1(r_0)+\frac{S_1}{S_2}\sigma_2(r_0)} + 2\int_r^{r_m} X(r')\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right)\int_{r_0}^{r'}\sigma_2(r'')dr''\right]dr'} \dots\dots(1)$$

ここで、 $X(r)$ は受信信号強度、 $S_1$ はエアロゾルのライダー比、 $S_2$ は大気分子のライダー比、 $\sigma_1(r)$ はエアロゾルの消散係数、 $\sigma_2(r)$ は大気分子の消散係数、 $r_0$ は境界高度である。この式の $S_1$ と $r_0$ は未知数であり、この状態での消散係数の推定は困難である。従って、適切な $S_1$ 、 $r_0$ を推定しなければならない。そこで、スカイラジオメータで得られる大気的光学的厚さとライダー観測データをライダー方程式に適用させて得られる大気的光学的厚さから $S_1$ の推定を試みた。この時の境界高度はエアロゾルの散乱が無視できる高度に設定した。

推定法を図9に示す。 $t_0$ はスカイラジオメータで得られた大気的光学的厚さ、 $t_x$ はライダー観測データから得られた大気的光学的厚さを表わしている。両者が交差する部分が $S_1$ の推定値である。この推定法を用いて $S_1$ を推定すると、35と65であった。この $S_1$ の値を各々Fernaldの解析法に適用させて、消散係数の高度分布を推定した。図10に消散係数の高度分布を示す。この時

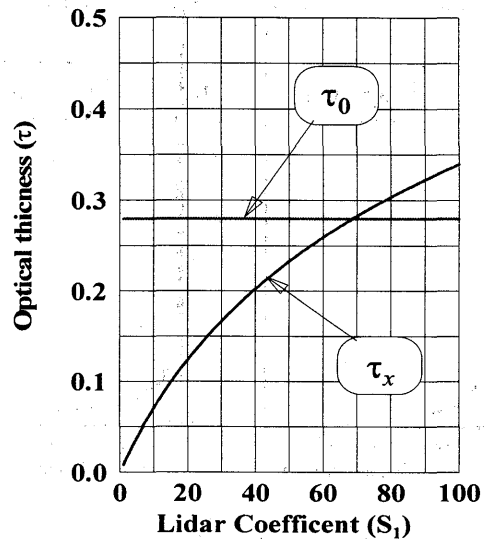


図9 推定法  
Fig.9 The presumed method.

の後方散乱光強度を図11に示す。後方散乱光強度の高度分布形状より、 $S_1$ が35になる条件は大気混濁度が低い場合、一方、65になる条件は上空の巻雲の存在に起因すると考えられる。

## 6. むすび

本稿では、2002年の観測結果についての報告、推定0℃高度による大気エアロゾルの状態判別、スカイラジオメータを用いた $S_1$ の推定及び、消散係数の高度分布の推定を試みたことについて述べた。

観測を自動化することにより、24時間大気エアロゾルの経時変化を把握できるようになった。今後は、背景光雑音の除去やビームエクパンダーでビーム径を拡げ、S/N比の向上を図り、処理の最適化を行なっていく必要がある。

また、観測の完全自動化を目指し、LANを介しての各計測機器の遠隔制御を図り、レーダからの情報を取り入れ、航空機の接近や天候の変化などの緊急時に、レーザを停止するシステムの構築を行なわなければならない。更に、レーザ波長を2波長(532nm,1064nm)にし、粒径分布を計測できるシステムの構築を行なっていく予定である。

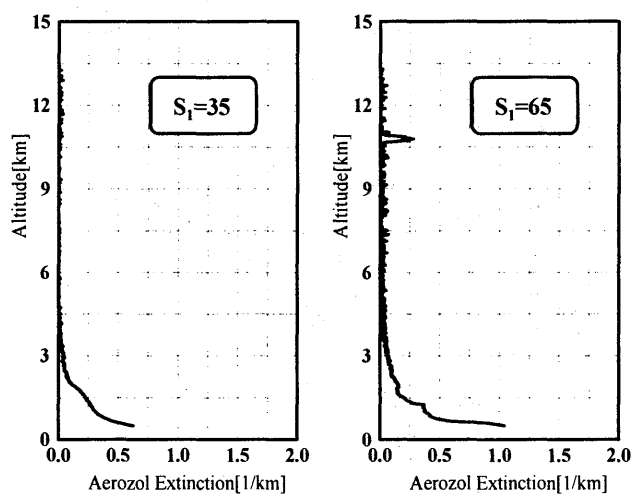


図 10 消散係数の高度分布  
Fig.10 Extinction coefficient.

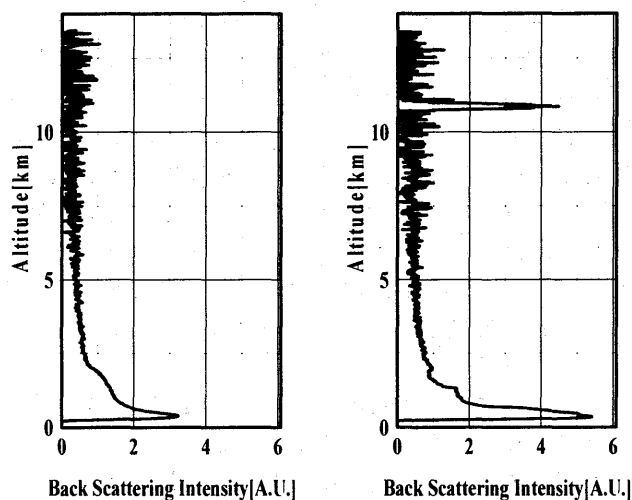


図 11 後方散乱光強度  
Fig.11 Back scattering intensity.

#### 参考文献

- [1] 香川直己, 辻原佳奈, 三島匡記: 対流圏大気環境計測のためのレーザ・レーダシステムの開発, 福山大学工学部紀要, vol.24, pp.23-30, (2000).
- [2] G.Tonna, T.Nakajima, R.Rao: Aerosol features retrieved from solar aureole data: a simulation study concerning a turbid atmosphere, Appl.Opt.vol.34,no.21,pp.4487-4499, (1995).
- [3] <http://weather.crc.co.jp/weatherchart/src/>

- [4] Michel I.Mischenko, Joachim W.Hovenier, Larry D.Travis: Light Scattering by Nonspherical Particles ACADEMIC PRESS, pp.408-411
- [5] 根元 順吉, 他: 図説気象学, 朝倉書房, pp.8-26
- [6] <http://info.nies.go.jp:8094/AnalysisMethods/DataAnalysis5.html>
- [7] 田中聡, 寺園将文, 吉田育穂: X バンドレーダシステムと偽像, 福山大学工学部紀要, vol.26, pp.9-14, (2002).