

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

香川直己* 辻原佳奈^{†a} 三島匡記[†]

Development of a Laser Radar System for Monitoring the Troposphere

Naoki KAGAWA, Kana TSUJIHARA, Masaki MISHIMA

ABSTRACT

The laser radar system is useful to observe vertical distribution of the aerosols in the atmosphere. One of the important aerosol is Asian dust (KOSA) in the troposphere because it is a tracer of air pollutant emitted in the Asian Continent. As Fukuyama is a good point for observing the Asian dust events, we constructed and drove a laser radar system allowing us to obtain the depolarization ratio from the scattered light by the particles.

In this paper, configuration of our laser radar system and the first data of both the backscatter coefficient and the depolarization ratio over the troposphere are shown.

キーワード：レーザレーダ，ライダ，ミー散乱，エアロゾル，黄砂

Keywords: laser radar, LIDAR, Mie scattering, aerosols, Asian dust

1. まえがき

環境問題に対する関心が高まっており、大気状態を保全し、制御することが重要な課題となっている。これに対処するには、時間的・空間的な大気状態のパラメータを直接的に精度よく測定することが有効である。このような計測を可能にするものとして、光の物理的特性を用いた計測法が挙げられる。光を応用した計測法は、非接触・遠隔計測性、即応性など多くの利点を持つ。

レーザレーダ (Laser Radar) はレーザを波源とするレーダであり、Light Detection and Ranging の頭文字をとってLIDAR (ライダー) とも呼ばれる。これはレーザ光線を直接用いる遠隔計測手法であり、大気の観測をする上で有効な手法であると云える。レーザレーダの特徴は、マイクロ波領域のレーダに比べて波長が3~6桁程度小さいことから、高距離分解能、及び高指向性 ($10^{-6} \sim 10^{-3}$ rad) に基づく高スペクトル分解能であることである。従って、大気中に浮遊する原子、分子、水滴、砂礫、埃などの検出を可能にする。さらに、風速、気温など各種の大気観測を行うことが可能で、通常的气象観測では得ることが困難な大気中の情報を時間的に連続して細かい高度分解能で検出できる。

この様にレーザレーダの適用には種々の可能性があ

るが[1]、一つの測定対象として、黄砂が挙げられる。これは、中国大陸の砂塵嵐を起源とするものであり、春の風物詩であるが、一方で対流圏での物質輸送を把握する上でのトレーサとして注目され、観測データが蓄積されている[2]。エアロゾルの垂直分布の測定が可能であるレーザレーダは多地点での同時計測を行うことで、より立体的な輸送情報の把握が可能になると期待されているため、現在、日本国内では、仙台、筑波、長野、東京、名古屋、岡山、及び長崎を観測地点として、レーザレーダによる黄砂のネットワーク観測を行い、データを共有することで黄砂が日本上空を輸送される過程をより大きな地理的スケールで観測することを試みている[3]。

本学の位置する福山は天候に恵まれ、レーザレーダによる観測に適している。また、瀬戸内海沿岸の独特の気候条件を持つことから、先の観測ネットワークにおいても、有意な観測データを提供することが期待できる。このような背景から、偏光解消度測定可能な、ミー散乱レーザレーダシステム的设计、構築をこの度行い、試験運用を開始した。

そこで本稿では、構築したシステムについて述べ、本システムを用いた最初のデータおよび、黄砂飛来時の偏光解消度データを得ることができたので、その結果を報告する。

* 電子・電気工学科 † 大学院電子・電気工学専攻 a 現 (株) 三城

2. システムの概要

図1は構築したレーザレーダシステムの概略図である。光源となるレーザはNd:YAGレーザ (INDI50:Spectra Physics) である。このレーザは波長532nm, 繰り返し周波数10Hzのフラッシュランプ励起のパルスレーザである。レーザヘッドから出射されたレーザ光は $\lambda/2$ 板にて、地面に対して水平な偏波を持つ光波に換えた後、仰角45度の誘電多層膜ミラーで反射されて大気中に放射される。

大気より戻ってくる散乱光は、シュミットカセグレン型反射望遠鏡 (SC335Lセレスロン:口径355mm, 焦点

距離3910mm) によって受信集光される。望遠鏡の焦点面には余分な背景光を除去するために視野絞り (aperture) を設ける。視野絞りを通じた光は45°に傾けた誘電多層膜ミラーで横に反射した後レンズで平行光にされ、平面ビームスプリッターにより2分岐される。ビームスプリッターにより反射される光軸は、散乱光強度測定用、透過される光軸は後述する偏光解消度計測用である。偏光解消度計測用の光軸は偏光ビームスプリッター・キューブにて、垂直偏波と水平偏波に分離されるこのシステムでは、地面に対して垂直な偏波が90°に反射され、地面に対して水平な偏波は透過する。

以上の過程により受信された散乱光は3分岐されるこ

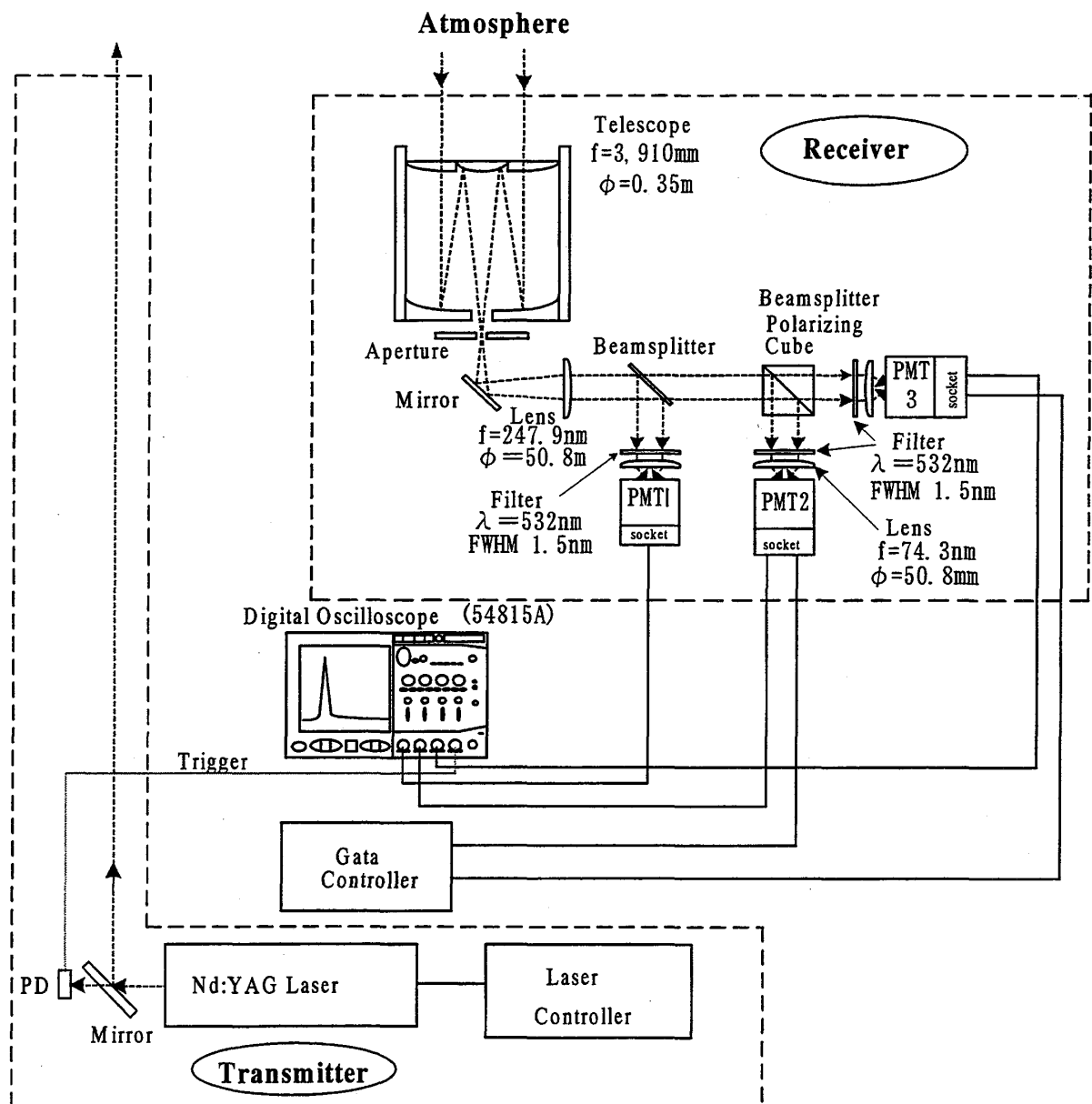


図1 構築したミー散乱レーザレーダシステムのブロック図
Fig.1 Block diagram of the constructed Mie laser radar system .

とになる。それぞれの光束は干渉フィルターによりレーザ波長と同じ波長成分だけを透過させた後、集光レンズでPMT(Photo Multiplier Tube：光電子増倍管)の光電面上に集光する。PMTは光パワを電流信号に変換する役割を担っている。各PMTはソケットにマウントされている。ソケットはPMTに電源を供給し、また、PMTから出力される電流信号を電圧信号に変換し、増幅するアンプが内蔵されている。また、PMT 2およびPMT3のソケットにはゲート機能が付いている。これは、外部からのパルス信号により、PMTの動作、非動作を制御することができ、高感度設定のPMTが低高度から散乱される強い光によって飽和することを避けるために用いる。

PMTソケットからの電圧信号はデジタルオシロスコープにて表示および記録をされる。なお、デジタルオシロスコープのトリガ信号として出射系の送信ミラーの付近にPD(Photo Diode)を置き、レーザ光が大気中に発射されたときに散乱する光を受光し利用する。

誘電多層膜ミラー以降の受信光学系は周囲の光や、出射レーザからの迷光の影響を受けないようにするために、ジュラルミン製の筐体(長さ610mm、幅および高さ240mm)内に固定した。図2に筐体後部からの外観写真、図3に図2右側から見た内部の様子を示す。望遠鏡で集光された光は図2奥に見える筐体天井の穴から採り入れられる。

PMTは衝撃や応力に弱いため衝撃を直接PMTに伝えないように然るべき剛性をもつ外殻が必要となる。そこ

で、3本のPMTはソケットを含めてステンレス製の筒(シールドソケット)に内蔵した。シールドソケットは全部で5つの部分からなり、ジュラルミン製筐体の三個所を貫通するように配置している。この時、金属製筐体と隙間が生じないように筐体との接合面、シールドソケットを構成する5つの部品の接合面には高い表面精度が必要となり、更に、シールドソケット内部に光電子増倍管、ソケット、フィルタ、レンズが円滑かつ隙間なく挿入できるように内壁の表面仕上げにも高い精度が要求される。これらの理由よりジュラルミン製筐体およびPMT用シールドソケットは設計の後、製作加工は外部に

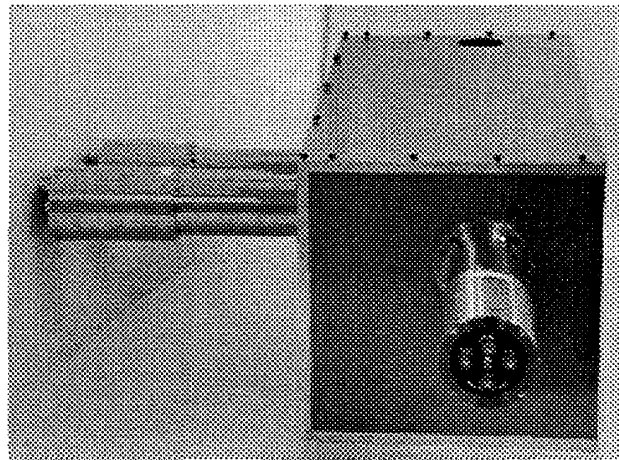


図2 筐体外部の写真
Fig.2 Outside view of a shielding box.

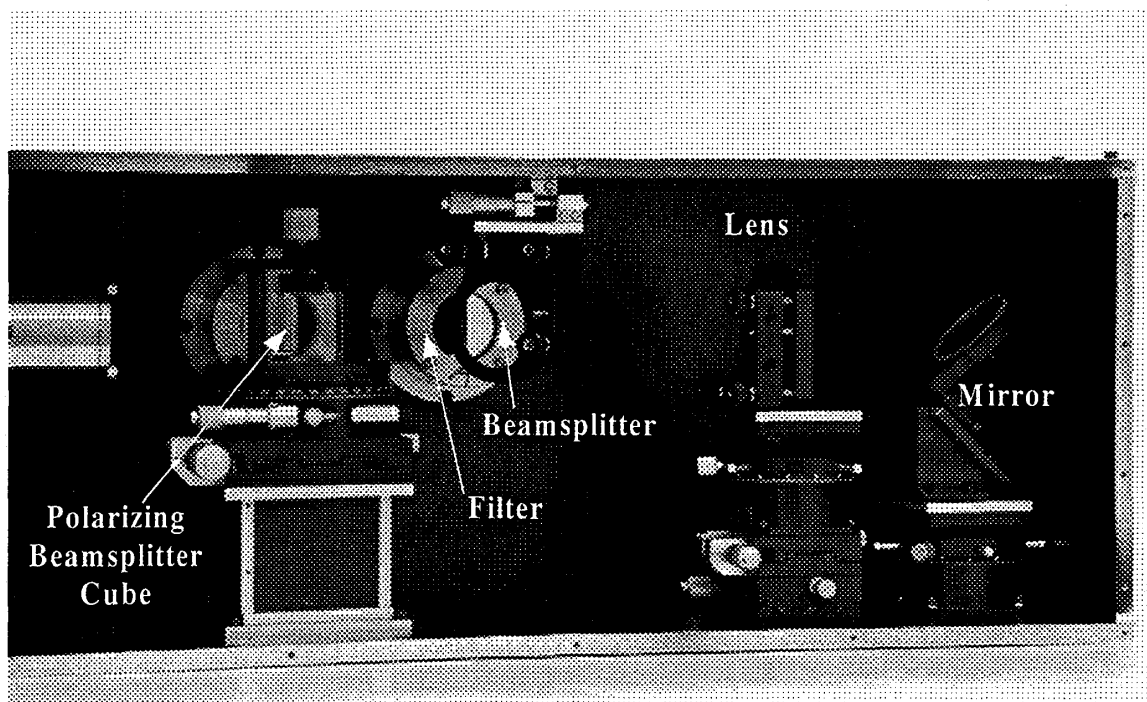


図3 筐体内部の様子
Fig.3 Inside view of a shielding box.

委託した。

レーザレーダのシステム一式は図4, 図5に示すように, 電子・電気棟(3号館)の電子機器学研究室(331室)に出窓を設け, その中に収納した。観測時は出窓上部のハッチを開ける。この動作環境により, レーザ光線を垂直に打ち上げることができる。垂直打ち上げはエコーの遅延時間と測定高度の対応が付けやすく, 有利である。

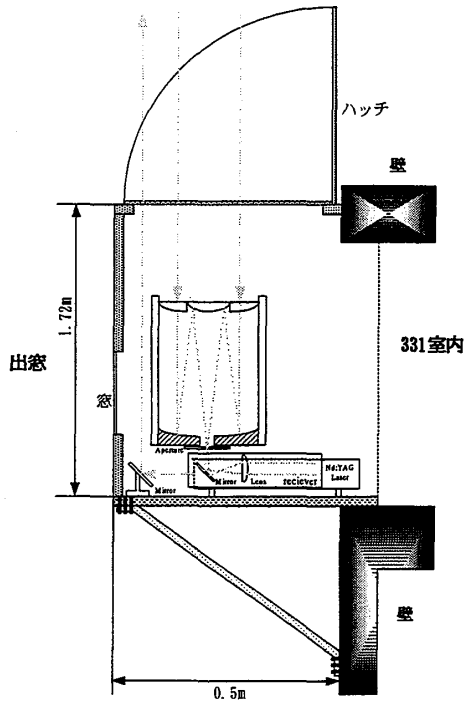


図4 垂直打ち上げ用出窓の概略図
Fig.4 A schematic diagram of the balcony for a laser radar system.



図5 レーザレーダ装置用出窓の外観写真
Fig.5 A photograph of the balcony for the laser radar system.

3. システムの性能評価

3.1 システムのSN比

ここでは, 本システムの測定可能な最高高度を見積もるために, 背景光雑音に対するSNRの算出を行う。SNRは夜間と昼間で異なり,

$$SNR = \begin{cases} \frac{n_r}{\sqrt{n_r}} & \text{(night time)} \\ \frac{n_r}{\sqrt{n_r + n_b}} & \text{(day time)} \end{cases} \dots \dots \dots (1)$$

で定義される[4]。ここで n_r は受信した散乱光の光子数, n_b は背景光の光子数である。 n_r はレーザレーダ方程式から,

$$n_r = N\eta \frac{\lambda P_0 K A Y(z) T^2(z) \{\beta_m(z) + \beta_a(z)\} \Delta z}{hc} \dots (2)$$

と表される。ここで, N は受信信号の積算回数, η はPMTの量子効率, λ はレーザ波長, h はプランク定数, c は光速, P_0 は射出パワー, K は送受信光学系の効率, A は受信望遠鏡の開口面積, $Y(z)$ は送信ビームと受信視野の重なり率, Δz は高度分解能, $T(z)$ は大気中のビームの透過率, $\beta_m(z)$ は大気分子の体積後方散乱径数(the volume backscattering coefficient), そして $\beta_a(z)$ はエアロゾルの体積後方散乱径数である。一方, n_b は

$$n_b = N \frac{\lambda I_0}{hc} \frac{1}{10^6} \nabla F \cdot \eta K A \frac{2\Delta z}{c} \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる。ここで, I_0 は太陽からの放射エネルギー(単位は $Wm^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$), ∇F は干渉フィルタの半値全幅である。

信号積算回数を64, 512, 1024回と変化させたときのSNRの計算結果を図6に示す。このとき使用したパラメータを表1に掲載する。図6上は昼間の, 下は夜間のSNRの高度変化を示している。

SNR=10を測定可能な限界高度であるとする, 昼間では積算回数1024回で約21km, 512回で約18km, 64回で約15kmまで測定可能であると予測できる。また夜間ではそれぞれ約51, 43, 35kmまで測定できることになる。ただし, この解析は天気が澄み切り, 大気による減衰が無く, また, レーザ出力エネルギーを最大にした状態で行っている。実際は, 大気は混濁しており, レーザの放射エネルギーも最大能力の数~数10%程度であるので, 実際の測定可能高度は更に低下することになる。

表1 システムパラメータ
Fig.1 System parameters.

レーザ波長[nm]	532
出射パワ[mJ]	245
積算回数[回]	64, 512, 1024
送受信系の光学効率[%]	50
受信開口面積[m ²]	0.38
PMTの量子効率[%]	0.12
距離分解能[m]	12
干渉フィルタの半値全幅[nm]	1.5
昼間の太陽の放射エネルギー[Wm ⁻² μm ⁻¹ sr ⁻¹]	1842
夜間の太陽の放射エネルギー[Wm ⁻² μm ⁻¹ sr ⁻¹]	0

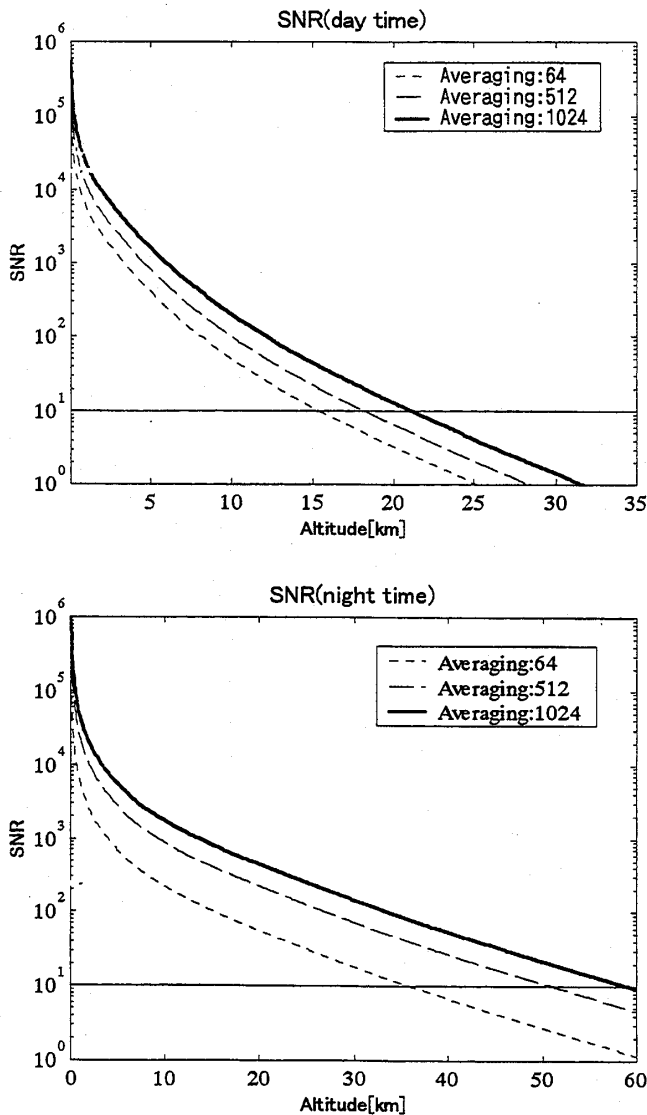


図6 積算回数をパラメータとした、昼間(上)、夜間(下)のSN比の計算結果。

Fig.6 The signal to noise ratio as functions of the altitude at the several averaging number of times.

3.2 受信視野の重なりと測定可能最低高度

散乱光を受光できる範囲は出射されたビームと望遠鏡の視野とが重なる部分である。そこで、測定可能な最低高度を決めるものとして、出射ビームと受信視野の重なりを考慮する。そこで、出射ビームと受光形の中心距離を y_0 を用いて、出射ビームと受信視野の重なり部分の差し渡し長さ、

$$F = (R + R_1) - y_0 \dots \dots \dots (4)$$

を定義する。ここで、 R , R_1 はそれぞれレーザが距離 z 進んだときのレーザの半径、受信望遠鏡の受光範囲である。出射ビームと受信視野の重なり始めから完全に重なる直前までの発射ポイントからの高度と出射ビームと受信視野の差と望遠鏡の中心から交わっているまでの距離を求め、図示したものが図7である。同図中にレーザの放射角度と望遠鏡の視野角の関係を示している。本システムでは、レーザ光軸と望遠鏡中心軸との距離は約200mm離れているので、図よりビームと視野が重なる測定可能最低高度は200m程度となる。

4. 測定実験

4.1 後方散乱係数の観測

構築したシステムは当初、PMT1だけを用いて試験運用を開始した。図8は1999年8月27日に初めて観測できたエコーから高度に対する後方散乱係数を計算したものである。後方散乱径数 $\beta(z)$ は大気分子の体積後方散乱係数 (the volume backscattering coefficient) $\beta_m(z)$ とエアロゾルの体積後方散乱径数 $\beta_a(z)$ の和であり、 $\beta_a(z)$ は $\beta_m(z)$ に比べて高々度で急激に減少する特徴を持つ。

$\beta(z)$ は受信光パワ $P(z)$ の距離二乗補正值 $X(z)$

$$X(z) = P(z)z^2 \dots \dots \dots (5)$$

を用いて、

$$\beta(z) = \frac{X(z)}{P_0 K Y(z) T^2(z)} \dots \dots \dots (6)$$

で求めることができる。本計算では、システムの効率を示す K を推定するために、 $\beta_m(z)$ が支配的になる高度を15kmとし、その高度での $\beta_m(z)$ の値に米国標準大気モデルを用いた。但し、大気による光の減衰を無視し、出射光パワを最大値として計算してあるため、実際の $\beta(z)$ より、小さく推定されている。

この測定結果から分かるように高度10km付近で大気中に物質が浮遊しているのが観測できた。この高度は対流圏の上限に近く、このエコーは巻雲であると考えられる。また、等間隔の測定ではないが、この物質が刻々と高度を変えている様子が捉えられている。20:20の測定結果では、3km付近に散乱係数の大きいエアロゾルが発

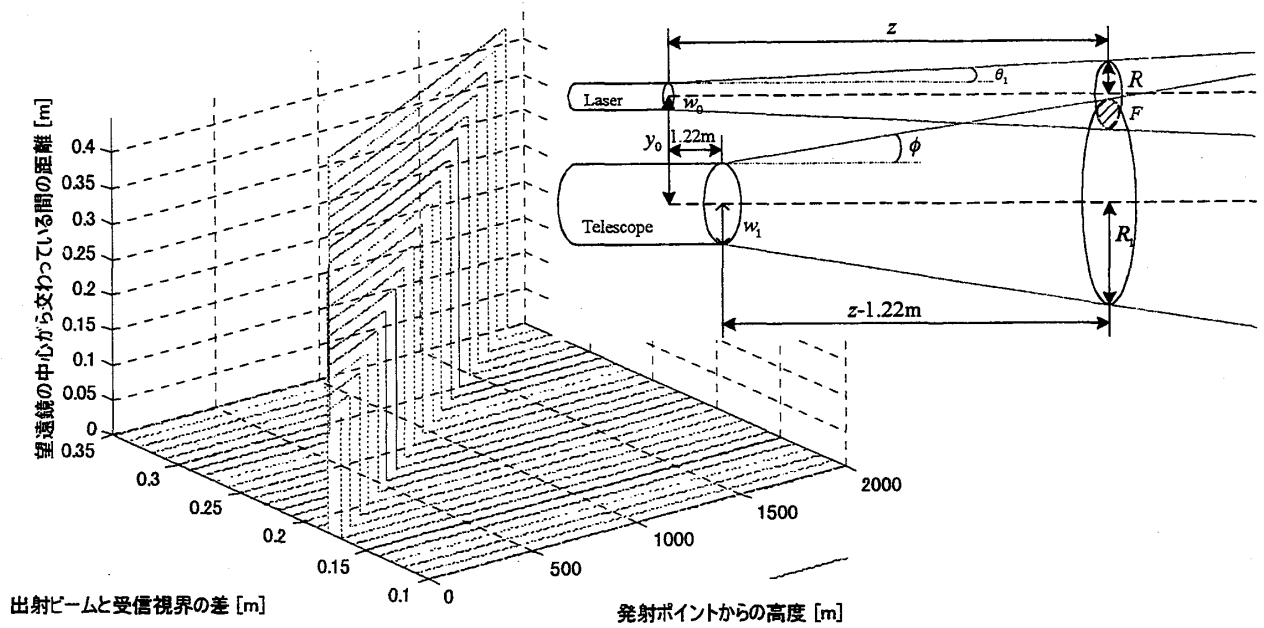


図7 レーザビーム径と望遠鏡視野の関係図と、望遠鏡の位置と観測可能最低高度の関係
 Fig.7 Schematic diagram of laser head and telescope, and relation of the positioning and the lower limiting altitude for monitoring.

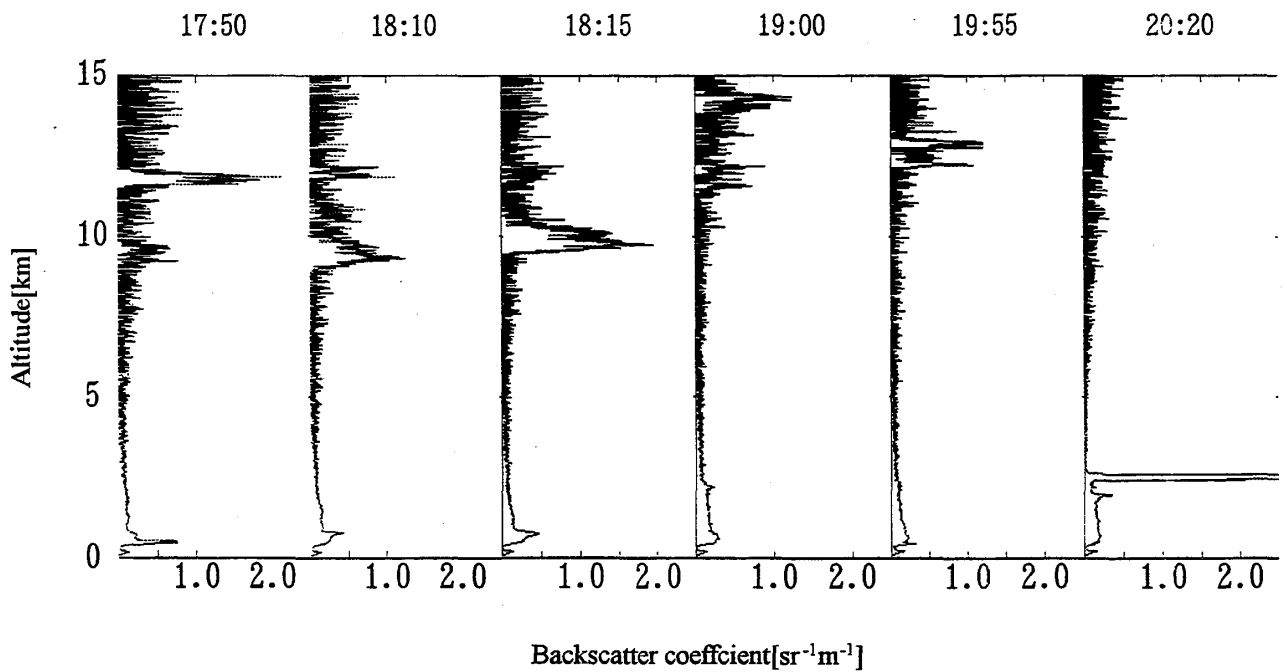


図8 初めて取得したエコーデータから推定した後方散乱係数の垂直分布
 Fig.8 Backscatter coefficient profiles calculated from the first light of our laser radar system on August 27, 1999.

生し、上空の大気の様子が観測できていない。この散乱体は目視により、雲であると確認している。

4. 2 偏光解消度を用いた黄砂の観測

偏光解消度とは、出射レーザー光の偏波方向に平行と垂直な後方散乱光パワーを P_{\perp} と P_{\parallel} とすると

$$\delta \equiv \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}} \dots \dots \dots (7)$$

と定義される[5]。偏光したレーザー光を大気中に射出し後方散乱光を測定すると、偏光が解消されることがある。この原因として、大気中の非球形粒子、非対称性の大きい分子の存在などが上げられる。球形粒子からの後方散乱光では、入射したレーザー光(直線偏波光)の偏光方向に垂直な成分は出てこないが、氷晶雲などの非球形粒子からの後方散乱光では垂直成分が出現する。

図9は2000年5月2日の観測データである。実線が偏光解消度[%]、破線は受信信号の距離2乗補正值 $P(z)z^2$ であり、散乱光の相対的な目安として掲載している。この日の早朝に黄砂飛来の情報を得たが、観測が開始できたのは、黄砂が終息に向かいつつある時刻からであった。このため、偏光解消度は2km以下において、刻々と減少していることが判る。16:30以降では数%の値に安定した。2km以上の高度の偏光解消度が見かけ上大きくなっているが、これは背景光の影響であり、この抑圧が今後の課題として挙げられる。

5. むすび

本稿では、設計、構築したミー散乱レーザーレーダシステムについて述べ、本システムを運用して初めて観測し

た、本学上空の対流圏内の体積後方散乱係数、および、黄砂飛来時の偏光解消度データを示した。

システムの完成度はまだ低い状態であるが、後方散乱係数、偏光解消度ともに現段階で妥当な結果を得ることができた。今後の課題としては、背景光雑音および電気系雑音に対するSN比の向上が挙げられる。また、自然現象を観測するためには、長時間の観測が要求される。このような理由から、観測の自動化を図る必要があると考えている。更には、レーザーレーダの持つ可能性を最大限に利用して、上空の風速、温度の観測も視野に入れたより有益なシステムに拡張して行く計画である。

謝辞

本研究の機会を与えて下さった方々に謝意を表します。

参考文献

- [1] 杉本伸夫, 竹内延夫: レーザーレーダによる大気計測, 応用物理, 63, 444-454, (1994).
- [2] Y. Iwasaka, et al.: Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles, *Tellus*, 40B, 494-503(1988).
- [3] T. Murayama, et al.: Lidar Network Observation of Asian Dust over Japan in 1999 Spring, *proc. of ILSS'99*, 25-28(1999).
- [4] 笹野泰弘, 小林喬郎: 大気微量成分計測のための航空機・人工衛星搭載レーザーレーダに関する基礎調査報告, 環境庁国立環境研究所, p. 41(1991).
- [5] R.M.Measures: Laser Remote Sensing, Wiley, New York, 46-47(1984).

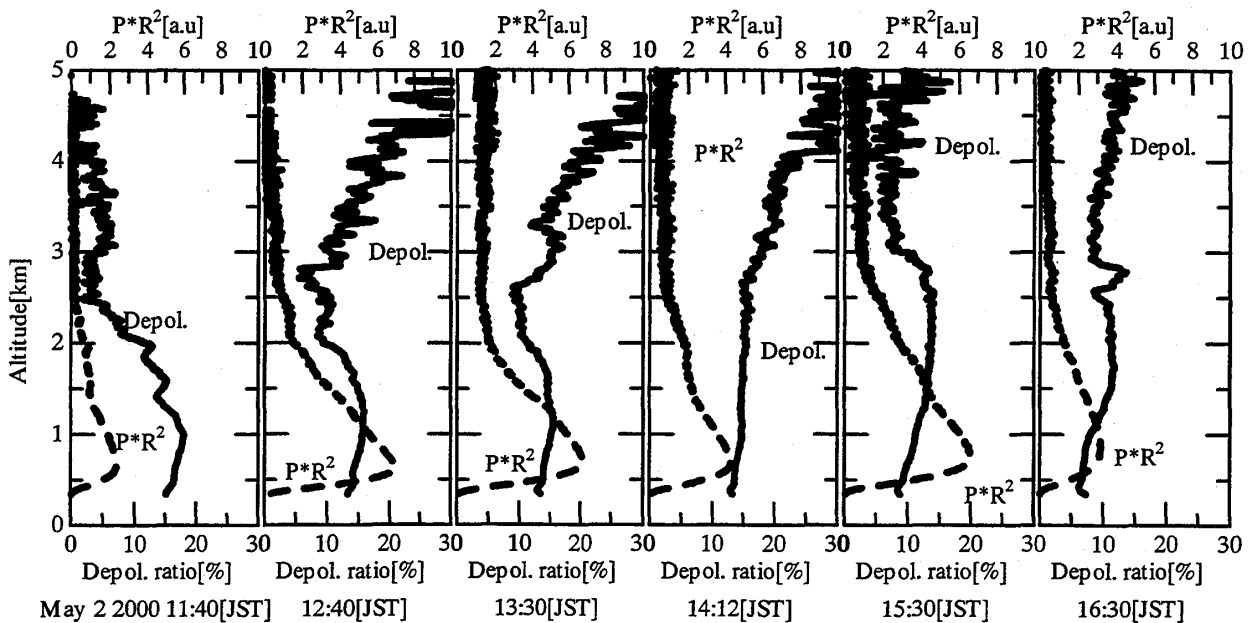


図9 2000年5月2日の黄砂観測データ
Fig.9 Depolarization ratio by the Asian dust at Fukuyama on May 2, 2000.