

明野観測所における 全天大気モニターシステムの開発

Tokonatsu Yamamoto

Abstract

宇宙線望遠鏡計画 (Telescope Array Project) R&D の一貫として、大気モニターシステムを 明野観測所で開発した。この装置は Nd:YAG LASER と LASER 射出台、受光装置からなり、天文ドームの中に格納されている。すべて Linux を搭載したコンピュータから制御され、ネットワークを通じて 遠隔操作が可能である。この装置を後方散乱光を測定する LIDAR として使い観測を行なった。観測データから一般的な LIDAR の解析方法を使い、全天で高精度で大気の透過率を測定する方法を開発した。この装置の詳細と大気透明度測定方法について報告する。

1 Intrduction

大気蛍光法を用いた宇宙線観測は、従来の地上で粒子数を測定する方法と比べ、さまざまな利点がある。例えば、空気シャワーの縦方向発達を直接観測できる点や、複数の検出機で観測することにより、高精度の測定が可能となる点である。これらにより、大気蛍光法は超高エネルギー宇宙線の観測精度を飛躍的に発展させることができる。一方、この方法は、空気シャワーから発せられる光が大気中を 10~60 km 伝搬した後を測定することになる。このため大気透明度の測定は大気蛍光法にとってもっとも重要キャリブレーションとなる。

空気シャワー中の荷電粒子は大気中の空気分子をレイキし、微弱な光を発する。この光は検出機に到達する前に、空気分子と衝突し Rayleigh 散乱を受けることになる。この散乱は 400nm の光に対して $X_r = 2974g/cm^2$ の減衰長になり、波長 λ に対する吸収量は以下の式で計算される。

$$\frac{dN_r}{dl} = -\rho \frac{N_r}{X_r} \left(\frac{400nm}{\lambda} \right)^4 \quad (1)$$

ここで ρ は大気密度。このとき吸収量は波長の -4 乗に比例し紫外線領域の測定に直接影響を与える。

今、海拔 1.5 km にある検出機により、仰角 10 度で 30 km 離れた場所の空気シャワーの測定について考える。この時空気シャワーからの光は約 $2200g/cm^2$ の空気を通過することになる。したがって Rayleigh 散乱により約 70 % の光が散乱されることになる。

大気中を伝搬する光を待ち受けているものは空気分子だけではない。大気中には、水蒸気、霧、雲、風で巻き上げられた砂、人間の活動により生み出される排気ガスや工場からの煙、山火事による煙などがあり、さらに北半球には 中国大陸からくる黄砂などさまざまなエアロゾルがある。これら大気中のエアロゾルは場所や時間により大きく変動し、大気中の光をミー散乱により散乱吸収する。典型的なミー散乱のスケールハイト H_M は 1.2 km、水平方向の減衰長 L_M は 20km である。この時、散乱される光の量は次式で表される。

$$\frac{dN_r}{dl} = L_M \times \exp(-height/H_M) \quad (2)$$

したがって先程の空気シャワーからの光は検出機に到達するまでに約 27 % 散乱される。結局検出機に到達できる光は 22 % 程度になる。

図 1は Telescope Array(TA) の性能を Monte-Carlo シミュレーションで計算した結果である。TA の一次宇宙線のエネルギー決定精度は大気中での光の減衰量が正確に分かれれば 6% である。しかし、もし大気中での光りの減衰長を 20 % 間違えて補正すると、エネルギーを約 10% 近く間違えて推定することになる。また TA では一次宇宙線の組成を決定する上で空気シャワーが大気中で最大発達を向かえる位置 X_{max} を使う。 X_{max} の決定精度は約 20g であるが、補正量を 20% 間違えると 10g 近くの系統誤差を持つことになる。大気による光の散乱量の補正はエネルギー決定だけでなく観測された空気シャワーの再構築にも重大な影響を及ぼす。シミュレーションの結果をみると、TA の性能を十分に発揮するには大気補正量を 10% 以下の精度で測定する必要があり、ミー散乱の水平方向の減

Energy Resolution

$$= 6\%$$

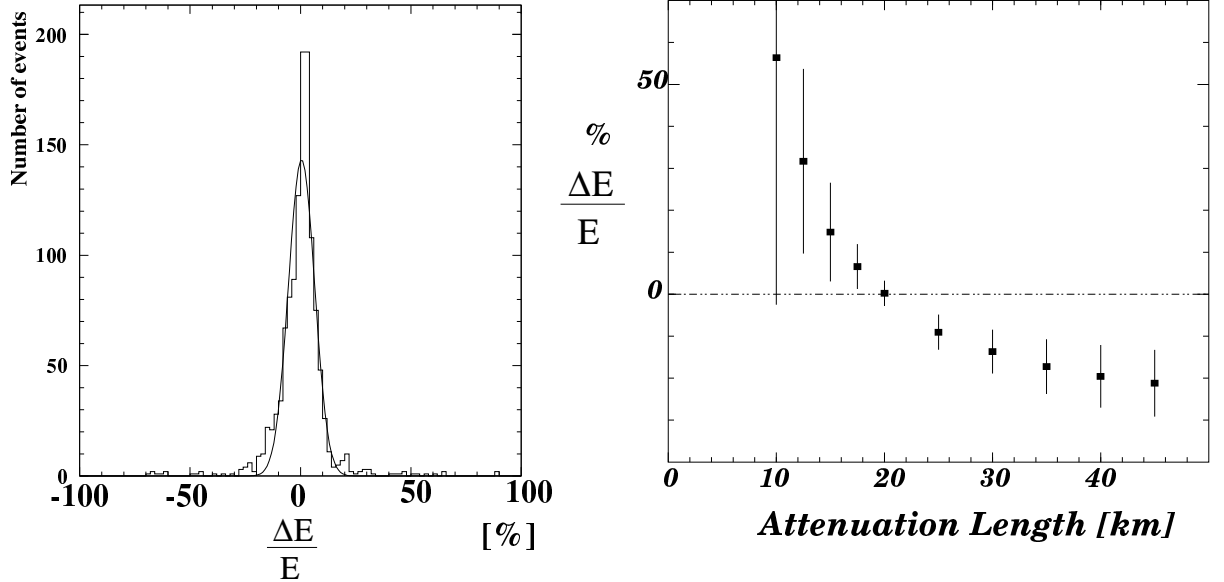


図 1: TAP の MC simulation の結果。左図は 10^{20} eV の空気シャワーにたいする エネルギー決定精度を示している。この図から TA のエネルギー決定精度は 1σ で 6% であることがわかる。右図は水平方向でのみ一散乱による補正量を間違えたとき、エネルギー推定量がどのくらいずれるかを示している。ここでは 宇宙線のエネルギーを 10^{20} eV とし、 H_M を 1.2km、真の L_M 20 km としている。 L_M を 4 km 間違えると推定されるエネルギーが 7% の 系統誤差をもつことになる。

衰長 L_M を -3~+6 km 以内、スケールハイト H_M を 0.36km 以内の精度で測定しなければならない。

この大気をモニターするため TA や High Resolution Fly's Eyes では LASER や フラッシュャーを使ったさまざまな方法が試験、開発されている [1]。大気透明度を測定する方法で最も良く知られている方法は LIDAR である。これは パルス LASER beam を大気中に放ち その後方散乱光を測定することにより 散乱量を測定する、リモートセンシング法であり、レーザーレーダーとも呼ばれる。

大気の変化を観測中常時モニターするため、この LIDAR 法を用いた 全天大気モニターシステムの開発を行なっている。この装置により 実際に測定を行ない 大気モニターを行なった。このレポートでは この装置について説明し、大気透明度の測定方法について議論する。

2 lidar equation

一般に LIDAR で観測される 後方散乱光の強度は 以下に示す LIDAR 方程式で表される。

$$P(R) = \frac{P_0 \kappa A (c\tau/2) \beta(R) T^2(R) Y(R)}{R^2} + P_b \quad (3)$$

$P(R)$: 受信光パワー

P_0 : 送信レーザーの光パワー

P_b : 背景光雑音

c : 光速

R : 観測対象までの距離

τ : レーザーパルスの持続時間 (パルス幅)

$Y(R)$: 幾何学滴効率 (レーザーの光路と望遠鏡の視野の重なり)

A : 受光系の開口面積

κ : 装置定数

$\beta(R)$: 後方散乱係数 (= 大気密度 $\times$ 散乱断面積)

$T(R)$: 透過率 ($= \exp(-\int_0^R \alpha dr)$)

$\alpha(R)$: 消散係数

この式で大気の状態によって変化する変数が 2 つある。一つは消散係数 α で、大気中で LASER puls が散乱される量を表し、減衰長の逆数になる。もう一つは後方散乱係数 β で検出機の方に散乱される光りの量に対応する。変数が 2 つあるため、一般に LIDAR 方程式は解くことができない。

ここで 装置定数 C と 測定量 $X(R)$ を

$$P_0 \kappa A \frac{c\tau}{2} Y(R) \equiv C \quad (4)$$

$$X(R) \equiv R^2 (P(R) - P_b) \quad (5)$$

とおくと LIDAR 方程式は

$$X(R) = C \beta(R) T^2(R) = C \beta(R) \cdot \exp(-2 \int_0^R \alpha dr) \quad (6)$$

となる。距離 R まで α が一定とすると

$$X(R) = C \beta(R) \exp(-2R\alpha) \quad (7)$$

となり、さらに

$$S(R) \equiv \ln(X(R)) \quad (8)$$

とおくと

$$\frac{dS(R)}{dR} = \frac{1}{\beta(R)} \frac{d\beta(R)}{dR} - 2\alpha(R) \quad (9)$$

となり LIDAR 方程式の微分型が得られる。

大気が均一であると β は距離によらず一定であるため、 $d\beta/dR = 0$ であり、

$$\alpha = -\frac{1}{2} \frac{dS}{dR} \quad (10)$$

となり α を測定することができる (スローブ法)。

2 つの未知数 α, β の間に何らかの関係を仮定すると、未知数が一つになり LIDAR 方程式を解くことができる。そこで、 α と β の間に経験的に得られた 以下の様な関係を仮定する手法が考案された。

$$\beta = \text{const} \cdot \alpha^k \quad (11)$$

ここで k は 大気の成分や LASER の波長によって変わり、典型的に 0.6~1 である。比例定数と k の 2 つのパラメータを導入することにより、phise function の変動を表すことになる。この式を 式 9 に代入すると

$$\frac{dS}{dR} = \frac{k}{\alpha} \frac{d\alpha}{dR} - 2\alpha \quad (12)$$

とベルヌーイ型の微分方程式になる。

Viezee は、境界条件を測定装置の近くにおいて 以下のような解を求めた [2]。

$$\alpha(R) = \frac{X(R)^{1/k}}{\frac{X(R_c)^{1/k}}{\alpha(R_c)} - \frac{2}{k} \int_R^{R_c} X r^{1/k} dr} \quad (13)$$

この解は 分母第 2 項がマイナスであるため、 R が大きくなり積分項が増大するにつれて、分母が 0 に近付き しばしば解が発散する不安定な解法であった。

そこで 境界条件を遠方 R_c にとる方法が Klett により提案され、以下の解が得られた [3]。

$$\alpha(R) = \frac{\exp[(S(R) - S(R_c))/k]}{\alpha(R_c) + \frac{2}{k} \int_R^{R_c} \exp[(S(r) - S(R_c))/k] dr} = \frac{X(R)^{1/k}}{\frac{X(R_c)^{1/k}}{\alpha(R_c)} + \frac{2}{k} \int_R^{R_c} X r^{1/k} dr} \quad (14)$$

この解は、 R が遠方から手前に向けて近付くにつれて、分母の積分が増大し、初期値 α_c の見積り誤差の影響が小さくなり、正しい解に収束する性質を持つ。これにより、係数 k と初期条件 $\frac{X(R_c)^{1/k}}{\alpha(R_c)}$ を決めれば 消散係数 $\alpha(R)$ が 求まる。

さらに 大気成分も考慮した解法が Fernald により提案されている [4]。この解法は $k = 1$ として、エアロゾルの散乱パラメータ $S_a \equiv \alpha_a / \beta_a$ を一定値として与えて解を求める方法である。これらの解析方法が提案されてから、弾性散乱に基づくライダー信号の解析は飛躍的に進歩した。

3 実験

観測は 山梨県明野村にある 東京大学宇宙線研究所明野観測所で行なっている。この観測所では agasa を初め シンチレーション検出器、red bagger, water tank, muon ditector 等さまざまな 宇宙線検出器が配置されている。

観測装置は この明野観測所の屋上に設置している。この装置は 図 2 に示す、天文ドームの中に設置されている。この天文ドームは 1.8 x 1.8 四方、高さ 1 m の立方体の部屋の上に ドーム部がのっている。ドーム部の開口部は約 1m で beam の方向に合わせてドームを回転させる必要がある。ドームの開閉と回転のためにそれぞれ 2 つのモータがとりつけてある。このモータの on、off をリレー回路により制御している。

この天文ドームの中に光学台が設置されていて、そこに LASER が設置されている。LASER の仕様を表 3 に示す。この LASER の 3 倍高長波を使うことにより、空気シャワーから発せられる シンチレーション光に近い 355nm の波長のパルスビームを観測している。ビームの最大強度は 7 mJ で 最大 10 Hz で打つことができる。ビームの強度、頻度、タイミングは全て RS232C を通じ コンピュータから制御することができる。

レーザー HEAD から射出されるビームは直線偏光をしているため、まず 光学台に設置された $1/4\lambda$ 波長板により円偏光に変えられる。その後 90 % 反射ミラーで 2 に分けられ 10 % のビームは エナジメータに送られ beam の強度のモニターに使われる。90% のビームは射出台に送られる。

LASER と 光学台は 防災エトロン製のカーテンにより外気から遮断されており、エアコンで一定の温度に保たれている。これにより LASER が安定して動き、また結露を防いでいる。

射出台の概略を図 3 に示す。射出台は真中が空洞になっている経緯台で、それぞれの軸には直接 エンコーダが取り付けられている。このエンコーダにより、5/1000 度の精度で経緯台の方向を計ることができる。各軸は AC ステッピングモータにより駆動されており、それぞれ 0.0072 度ステップで制御されている。このモータはシグマ光機社の Mark202 により制御している。これらのシステムは全て RS232C を通じてリモートから制御されている。この経緯台は両軸とも 最大 10 deg/sec の速さで動かすことができる。

Az 軸には IR カメラがマウントされている。このカメラを使い夜空の温度をはかることにより、雲をモニターしている。このカメラは。。社。。を使っている RS232C を通じて制御している。-20 度から+20 度までの温度に感度があり、視野は。。である。このカメラからの画像は転送速度をあげるため ppm 形式の画像ファイルとして VIDEO captur ボードから取り込んでいる。

仰角軸にはビームを射出する全反射鏡と後方散乱光を測定する受光鏡が取り付けられている。最終的に射出台から照射される beam の最大エネルギーは 約 5 mJ である。受光鏡は常に ビームと同じ向きになるように調節されており、16cm 口径、焦点距離 16cm の放物面鏡を採用している。焦点に 1 inch PMT が装着されており、視野は約 1 度になる。

PMT にかける 高電圧は DC-DC コンバータにより作っており、NI 社の LABPC DAQ ボードから送られる低電圧電流により 0 から 2000 V まで制御されている。観測中は 1700 V の高電圧がかけられ約 10^6 の利得で観測している。

装置	メーカ	型番
天文ドーム	eyebell	astro-dome
架台付光学台	シグマ光機	Σ -11AHT(3)L
ドームコントローラ	SOFTEC	NEWS-LX
LASER	NEW WAVE RESEARCH	QuikLaze
AZ モータ	ORIENTAL MOTOR	PK599-B
EL モータ	ORIENTAL MOROR	UPD544HG2-NB
モータコントローラ	SIGMA KOKI	Mark-202
エンコーダ	HEIDENHAIN	ERN180-3600
エンコーダカウンタ	HEIDENHAIN	ND 281
デジタルオシロ	Tektronix	TDS33014
energy meter	SCIENTECH	SPHF25
雨滴センサー	PREDE	PPS-02-1
GPS タイムサーバー	SPA	ジュピター
IR カメラ	日本アビオニクス	Neo Thermo TVS-610
ビデオキャプチャー	I-O DATA	GV-VCP2/PCI
PMT	浜松ホトニクス	R3478
HV	松定プレシジョン	HJPM-2NI-SP
multi-DAQ ボード	National Instrumets	LAB-PC+
Weather Station	RaioShack	WX200

表 1: LIDAR に使用している装置

時間は GPS を使い 5 分おきに調節され、weather stasion を使い 観測中の気象データをモニターしている。さらに .. 社の雨センサーを使い 観測中雨が降ったときは 自動的に観測が終了するようになっている。

全ての装置は OS に Linux を搭載したローカルコンピュータから制御され、ネットワークを通じ遠隔操作が可能である。

Prototype of LIDAR System in Akeno

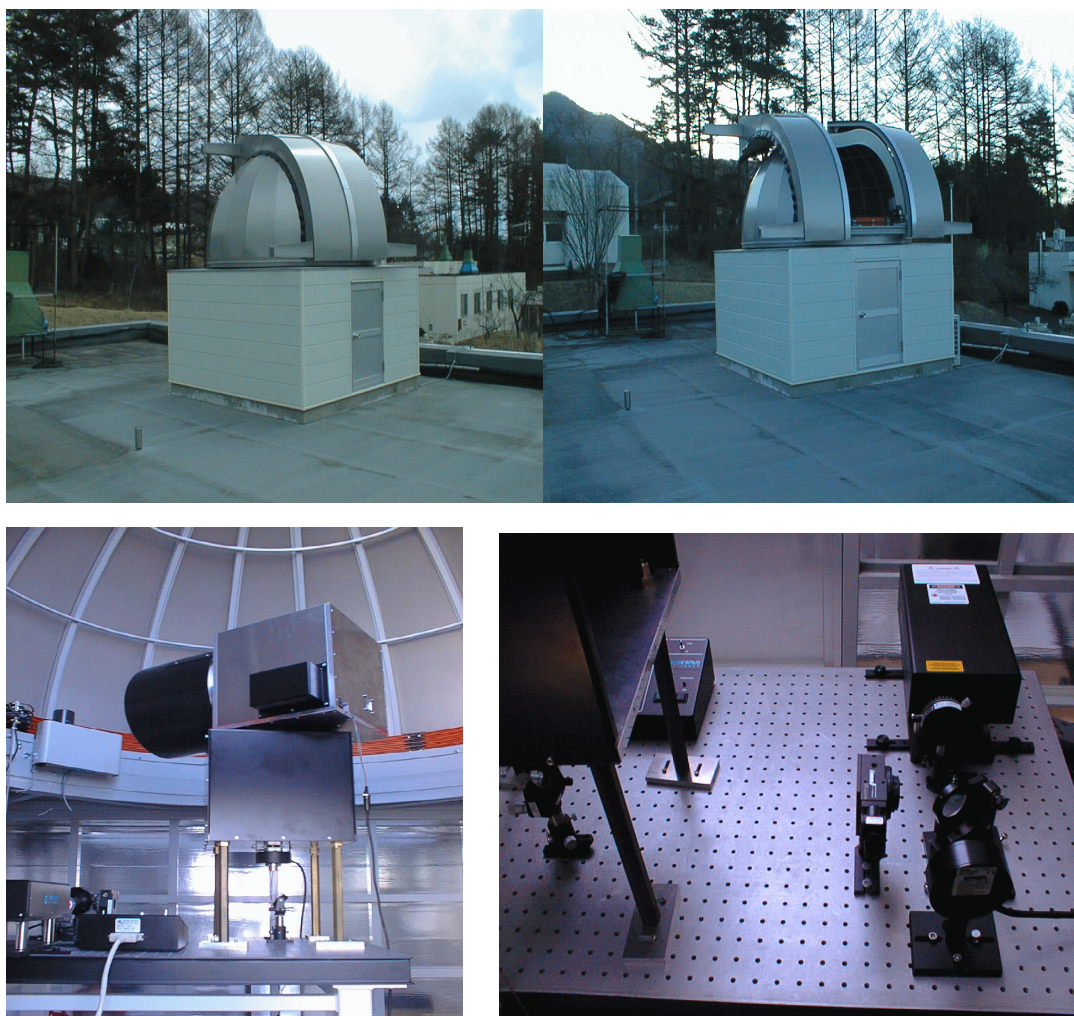


図 2: 明野 Steerable Lidar System

Wave length[nm]	1064	532	355	266
Pulse Width[ns]	6-8	5-7	4-6	4-6
Energy [mJ]	50	25	7	5
Pulse Repetition Rage [Hz]	10	10	10	10
Beam Diameter [mm]	2.75	2.5	2	2
Beam Divergence [mrad]	3	3	2	2

表 2: LASER の仕様。Flash lamp と Qswitch を搭載した 水冷 Nd:YAG LASER。観測には 3 倍高調波 355 nm の波長を使用している。

4 データ収集系

PMT からの信号は Tektronix 社のデジタルオシロ TDS33014 に送られている。

デジタルオシロは 100 M Hz でサンプリングしている。実際の観測ではダイナミックレンジを上げるため 4 通りの設定で測定しているが、ここでは縦軸を 10 mV/DIV、横軸を 10 μ sec / DIV としたときの測定を考える。この時、時間分解能は 200 nsec になる。500 点測定できるため、後方散乱光測定の場合、距離分解能 ΔL は 30m になり、15km 遠方まで測定していることになる。縦軸は 1 bit あたり 約 0.4 mV で 256 bits 測定できる。

今 レーリー散乱の減衰長 λ を 18km と仮定すると、打った beam の強度 $I = 5\text{mJ}$ に対して、測定点でレーリー散乱により散乱される光の量 ΔI は

$$\Delta I = I - e^{-\frac{\Delta L}{\lambda}} I \simeq \frac{30\text{m}}{18\text{km}} \cdot 5\text{mJ} \simeq 10^{-5} J = \frac{1}{1.6} \times 10^{14} \text{eV} \quad (15)$$

1 photon $\simeq 3 \text{ eV}$ とすると

$$\frac{1}{1.6} \times 10^{14} / 3\text{eV} \simeq 2 \times 10^{13} \text{個} \quad (16)$$

の photon が散乱されたことになる。距離 3 km の測定点において、beam の減衰を無視したとき、測定される photon の数を見積もる。口径 16 cm の鏡に対し、3 km の測定点がある立体角は

$$\frac{1}{4\pi} \left(\frac{16\text{cm}}{3\text{km}} \right)^2 = 2.26 \times 10^{10} \quad (17)$$

であるから観測される光子の数は 約 1000 個になる。PMT の量子効率を 10 % とすると観測される光電子数は 100 個になる。

PMT の gain は約 10^6 、サンプリングが 10^8 Hz 、シグナルケーブルのインピーダンスが 50Ω であるから、1 個の光電子に対して、

$$V = I \cdot R = \frac{Q}{t} R = \frac{1.6 \times 10^{-19} \cdot 10^6}{10^{-8}} \cdot 50 = 8 \times 10^{-4} [\text{V}] \quad (18)$$

となり、1 bit $\sim 1.6 \text{ p.e.}$ で観測していることになる。

図 4 に天頂方向に beam を打ったときの 後方散乱光測定結果を示す。この図をみると 6 μ sec で 約 80 mV の波形になっており、上の計算と大体一致している。

5 Observation

Telescope Array 計画は 砂漠に 40km 間隔で 8 個の station を配置する予定である。各 station にオペレータを配置することはせず、全てリモートからネットワークを通じておこなう予定である。このため、この大気モニターも 約 100km はなれた東京大学柏キャンパスから制御し、観測を自動化している。観測は月が視野に入らず 雨の降っていない日に行なわれる。

測定点から検出器に届く後方散乱光の量は、測定点までの距離の 2 乗で減衰し、さらに beam の強度と大気密度の減少がかかる。このため 近傍では莫大な散乱光が装置に入るのに対し、遠方では信号が微弱になり、数桁に及ぶダイナミックレンジが必要になる。PMT の測定範囲はせいぜい 3 桁ほどであり、beam の強度を上げると近傍の散乱光で PMT が飽和し、生き返るまでに 数十 μsec かかる。beam の強度を落すと遠方からのシグナルが弱くなり 測定回数を増やす必要があつたため、測定時間が増える。

観測は ダイナミックレンジを稼ぐため、高感度設定と低感度設定の 2 通りの測定をしており、それぞれ 2 通りの設定を使用している (図 4,5)。まず 高感度設定では beam を最大 energy に近い 5 mJ で放ち 横軸を $10\mu\text{sec}/\text{DIV}$ レンジにして、縦軸を $1\text{mV}/\text{DIV}$ 、と $10\text{mV}/\text{DIV}$ の 2ch 読み込む。 $1\text{ms}/\text{DIV}$ の ch は 1bit が 約 0.04mV に相当する。この設定により遠方の大気を測定する。

低感度設定では beam の強度を $1/12$ に落とし、横軸を $200\mu\text{sec}/\text{DIV}$ にし、縦軸を $10\text{mV}/\text{DIV}$ と $200\text{mV}/\text{DIV}$ の 2ch をつかって測定する。この設定により 3 km 以内の大気を測定している。

beam を 5 mJ で打った時、近傍の散乱光で PMT が飽和し、感度が復元するまで 9 μsec かかる。近傍の大気は beam を $1/12$ の強度で打ったときのデータで測定するが、それでも 3 μsec 以内のデータは捨てている。遠方は signal の強度が 0.2mV 以下になった時点でそれ以遠のデータは捨てている。これは $1\text{mV}/\text{DIV}$ でデータをとった時、約 5 bits に相当する。これ以下の signal は ノイズや pedestal の変化の影響を受けやすいため使わない。

この時 16 shots の平均をデジタルオシロから読み込み ローカルコンピュータのディスクに記録している。これを 天頂方向と水平方向で 48 回続けて行ない、それ以外の方向は 16 回行なっている。つまり 天頂方向と水平方向は 1024 shots 測定し、それ以外の方向は 256 shots 測定している。測定は まず 天頂方向を測定し、その後天頂角 5 度おきに 水平方向まで測定している。

それぞれの設定で収集したデータを平均し、パルスハイトを受光装置から散乱点までの距離の 2 乗で補正した結果 $X(R)$ を 図 6 に示す。図には 鉛直方向に beam を打った時と、水平方向に打った時の結果を示している。水平方向に打った時、大気が一様なら $\log(X(R)) (=S(R))$ は距離に正比例し、式 10 から消散係数 α が求まる。大気が非一様なとき、傾きが途中で変化する。図をみると 天気が良ければ 10 km 先まで beam が 直線状に減衰している様子が確認できる。約 10 km 先に山があり、この山による散乱光も確認できる。天気が悪くなると、大気の一様性がくずれ、直線から大きく外れていく。天頂方向に打ったとき 雲があるところで signal の強度が急激に強くなっている。天気が良い時、天頂方向は 10 km 以上上空まで測定できている。

天頂毎の測定を図 7 に示す。図には 4 通りの天候のデータを示している。天頂角が大きいと、beam が通るスラントデプスが大きくなり、beam が急激に減衰していく。天頂角が小さいとき、雲がある所で、散乱光が大きくなり、雲を通り抜けると beam が急激に減衰している様子が分かる。雲がほぼ同じ高さに分布している様子がわかる。

上記のデータを使い 次節で 大気の透明度を 2 次元で測定する方法を考える。

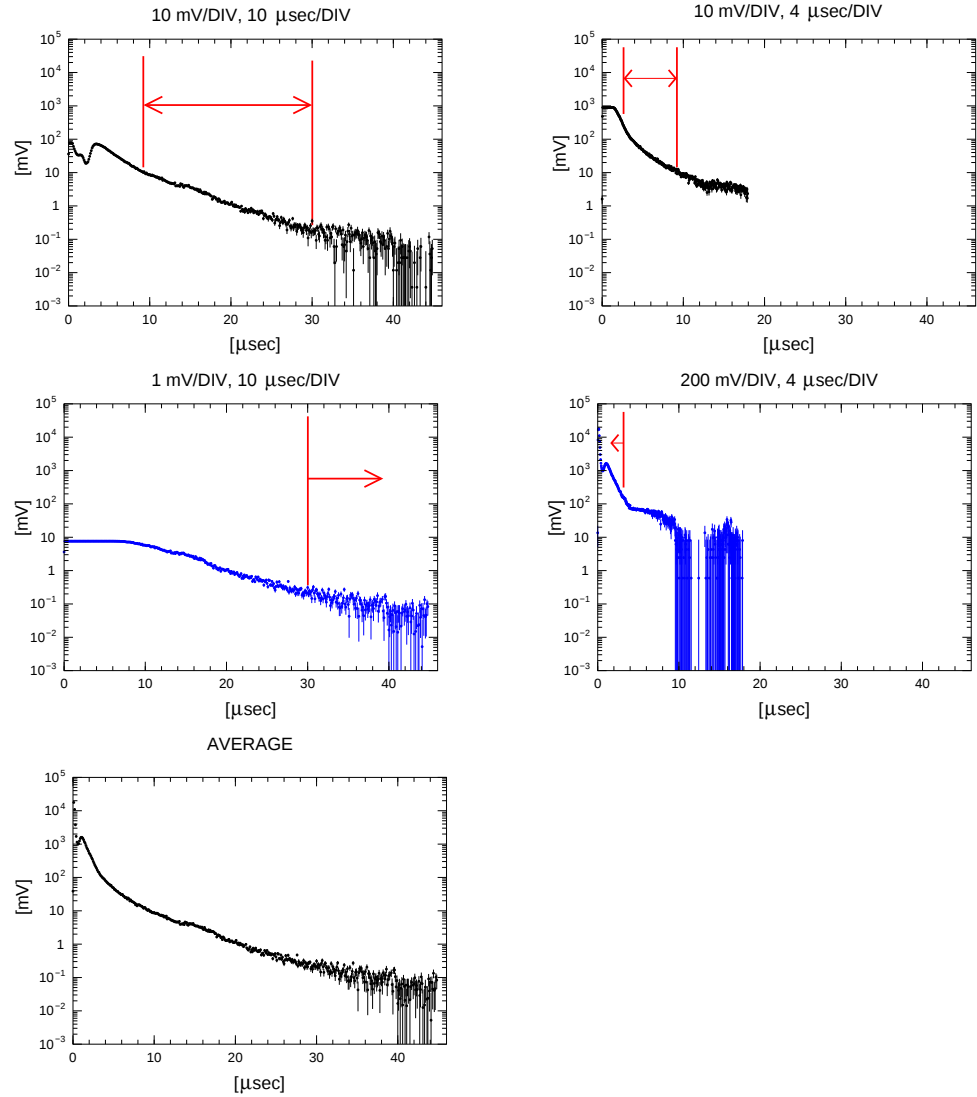


図 4: データのサンプル。天頂方向 1024 shots の平均をプロットしている。ダイナミックレンジを稼ぐため 4 通りの方法でデータを収集している。左上と中の図では beam の強度を 5 mJ にし、遠方の弱いシグナルを測定している。右の図は beam の強度を 1/12 に落し近傍の強いシグナルを測定している。それぞれ赤線で示した領域のデータを使っている。下の図が 4 通りのデータを合わせた結果。この図で実際の解析には $3.6\mu\text{sec}$ 以遠のみを使っている。

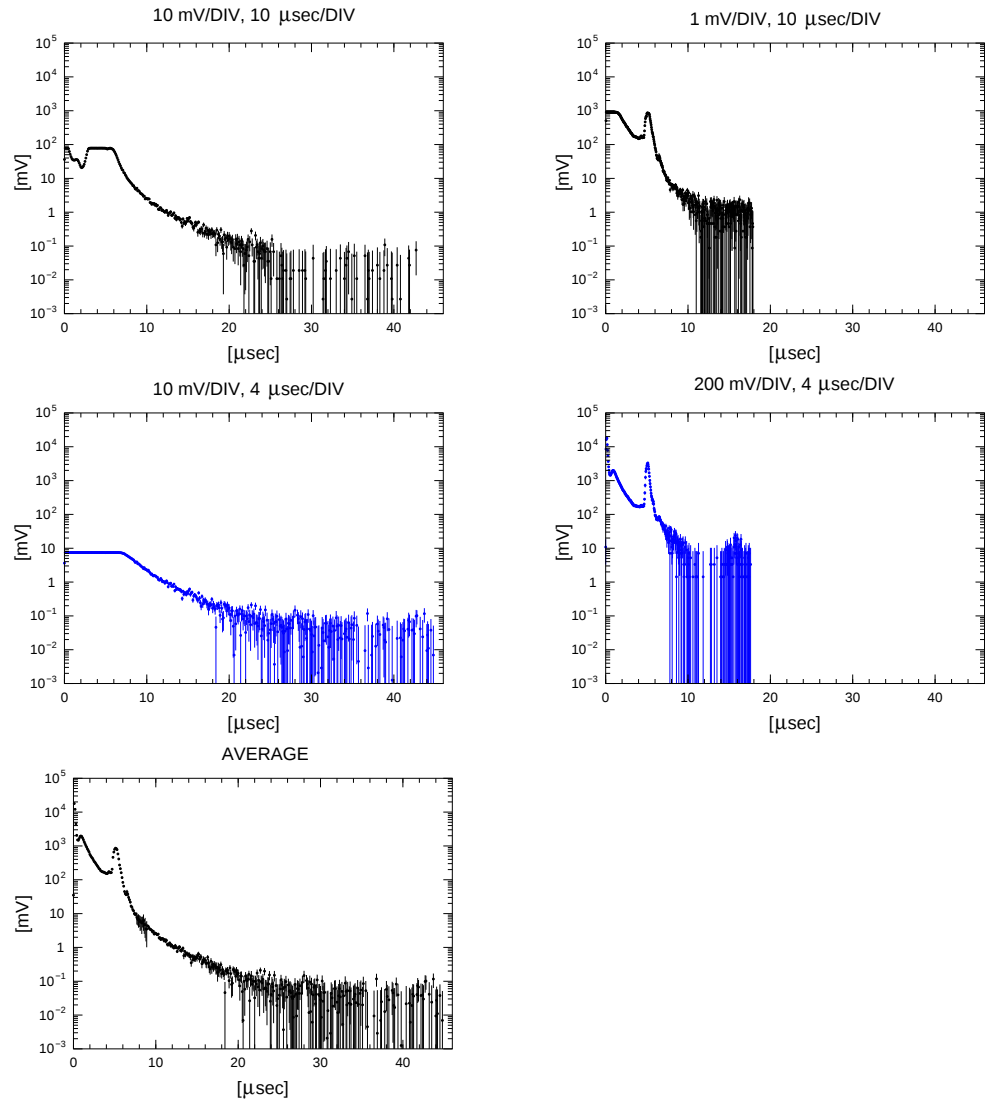


図 5: データのサンプル $2.5 \mu\text{sec}$ 付近に雲があり、雲を抜けたところでシグナルが急激に減衰しているようすが分かる。

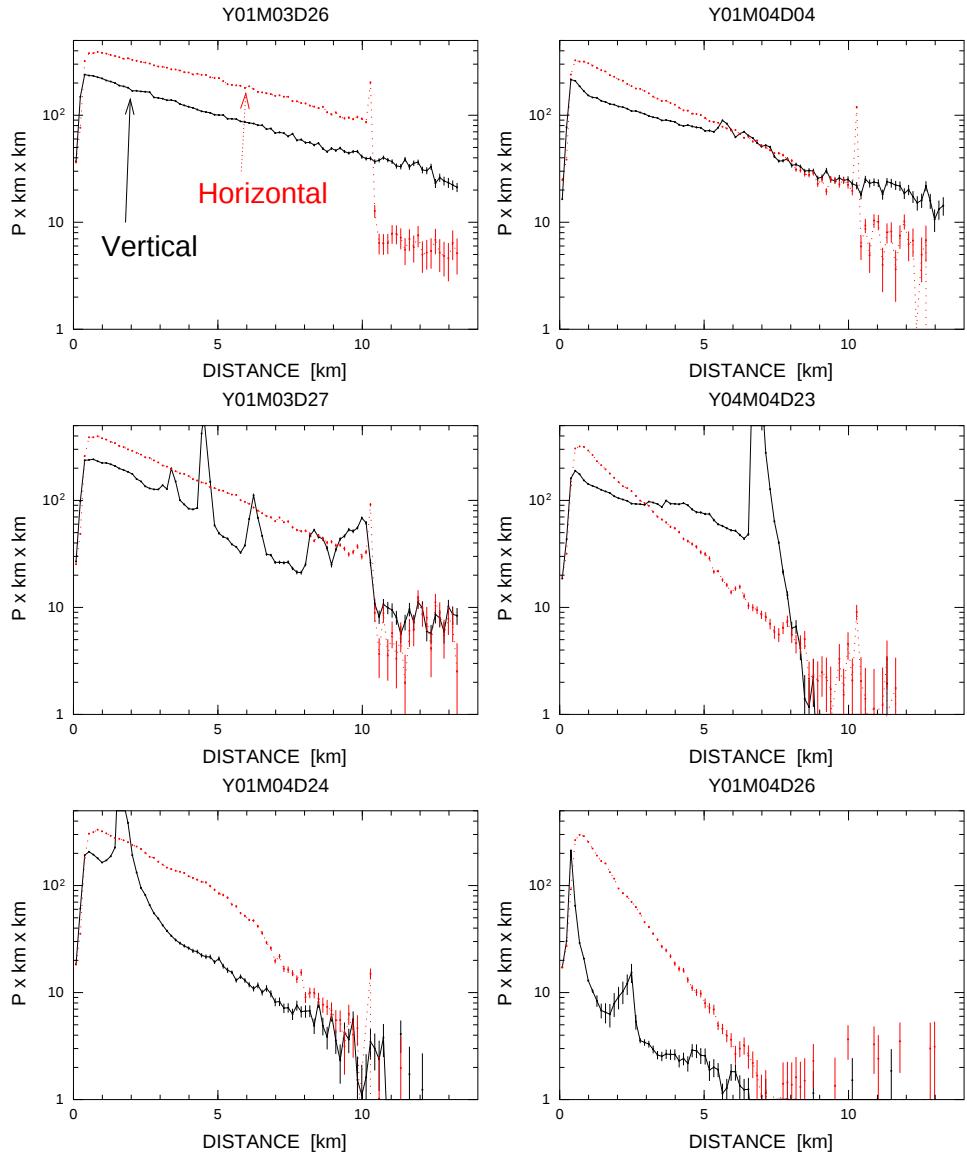


図 6: 横軸は LASER からの距離 R 。縦軸はパルス高さを距離 2 乗で補正した値 ($X(R)$)。赤線は水平方向の測定結果。黒線は鉛直方向の測定結果。左上の図がもっとも天気の良いとき。右下は天気が悪いとき。水平方向 約 10km 先に山があり、山で散乱された後 beam が消えている様子が分かる。水平方向に打ったとき大気が一様なら図は直線になり、傾きが $-\alpha$ になる。天気の良いとき、一様性が十分保たれていて、天気が悪いと 一様性が崩れている様子が確認できる。

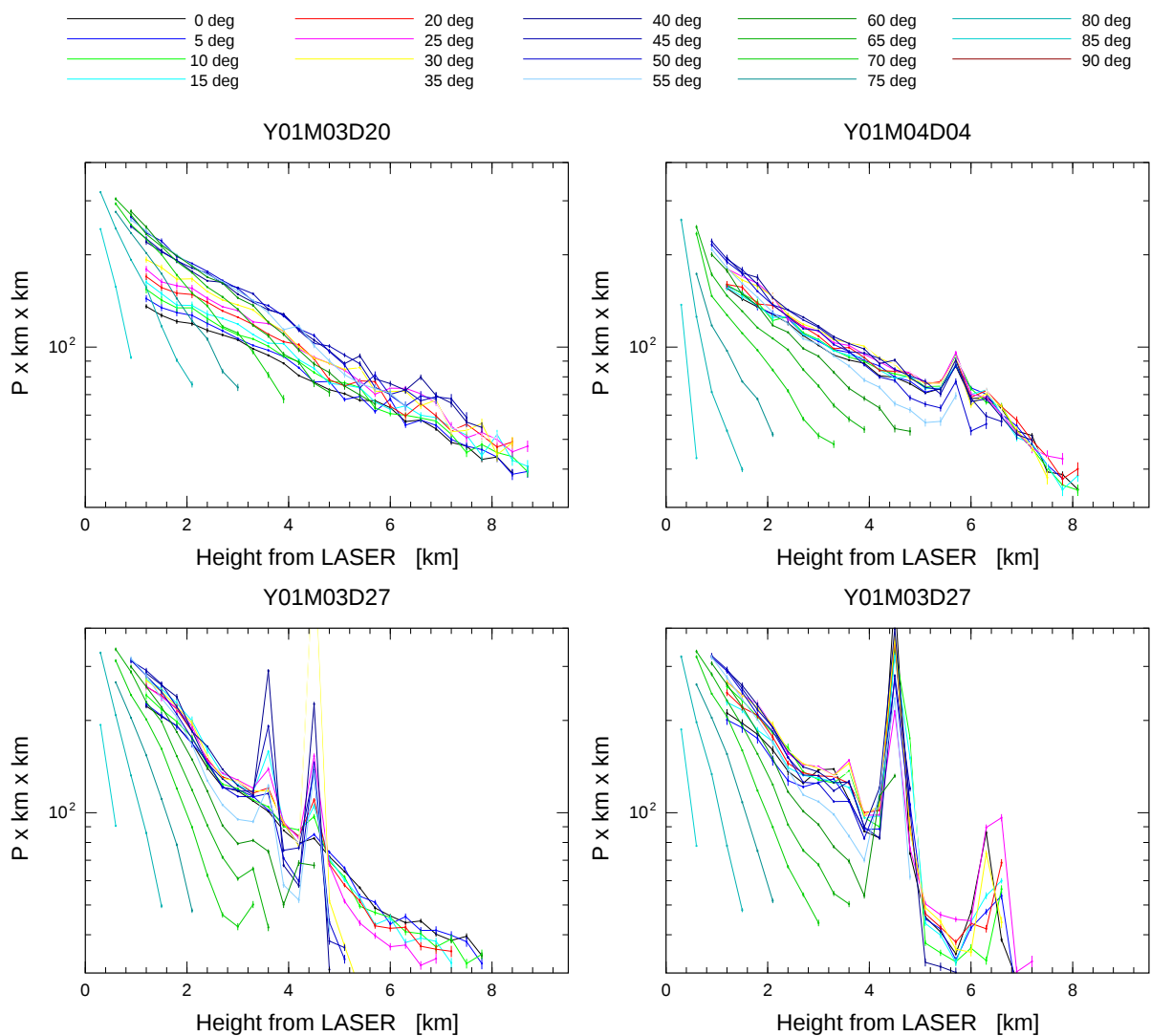


図 7: 横軸は LASER からの高さ、縦軸は $X(R)$ 。天頂角毎に色を分けてプロットしている。4 つの測定例を示している。左上がもっとも天気が良いとき。右下は曇り。beam が通る slant depth が変わるため、天頂角が大きい程 傾きが急になる。ほぼ同じ高度に雲ができていた様子分かる。

6 Analysis

上記により詳述された方法で収集されたデータから どのようにして大気の透明度を測定するかをこの節で議論する。

最もシンプルな測定が水平方向の測定である。大気が高さのみに依存するとき 水平方向に beam を打つと LIDAR 方程式は 式 10 のようにかける。このとき 後方散乱係数が消え 消散係数が一意的に求められる。水平方向の測定の例を図 8 に示す。図では距離 1.2 から 5 km までの 比較的近傍で 精度良く測定できる範囲のみをプロットしている。この方法は 仮定となっている、大気の一様性を確認できる上に 高精度で測定できる利点がある。推定された α と 同時に測定された湿度の変動を 図 9 に示す。大気の透過度は湿度のみから決まるわけではないが、この図から湿度のわずかな変化に追従して消散係数も変化していて 高精度で測定できていることが確認できる。

2 節で示したように LIDAR 方程式は 2 つのパラメータを持つため 一般に解くことができない。1977 年に klett が 消散係数 α と後方散乱係数 β の間に、式 11 で示される関係を 仮定することにより漸化的に解く解法を考案した。この方法を使い全天で大気透明度を推定する方法を考える。klett の方法を使うためには 2 つの初期条件を与える必要がある。1 つは遠方での境界条件で、もう一つは α と β の関係 (k) である。これらを決定するため以下に示す仮定をおいた。

- 鉛直方向の測定で、消散係数がもっとも小さい値 (通常は最も高度が高い所の値) が Rayleigh 散乱から期待される値に一致する。
- 天頂角が 5 度以上の測定では 消散係数が最も小さい点 (雲等の影響を受けていない場所) から 100m 以内の高度の値が、天頂角が ± 5 度の方向の値と平均的に一致するように境界条件を決める。
- 高度が 100 m 以下の消散係数が、天頂角 0 度の測定値と一致するように パラメータ k を調節する。

1 番目の仮定は 上空で空気が透明でありミ ー散乱の影響が無視できる必要がある。天気が良いときは 高度 10 km 以上でこの仮定が十分な精度で成り立つが、天気が悪いと この仮定によりもっと大きな系統誤差が生じる。2 番目の仮定は 平均的に大気が高さのみに依存していることが必要である。観測範囲全体が雲等の影響を受け 一様大気の仮定が成り立たないときは、消散係数を正しく計算することができなくなる。一般に TA の観測は 天候が良く上記の仮定が十分成り立つ時にのみ行なう。

以上の仮定のもとに LASER から 12 km 以内の消散係数を推定した結果を図 10 に示す。図には 6 通りの例を示している。天候が良い時は高度の高いところで、ミ ー散乱の影響が無視でき、高精度で α を推定することができている。雲等があり、遠方が見えないときは境界条件が正しく求まらず、特に高度の高いところで大きな誤差を持つと考えられる。また雲の無いところで 一様大気の仮定が十分な精度で成り立っていることが確認できる。

図 11 から 16 に半径 12 km 以内の消散係数の分布を示す。図 11 は最も天気が良かった時の結果で、ほとんどレーリー散乱のみで説明でき、また大気が一様であったことがうかが

える。図 15 を見ると 高度 5 km 付近に薄く霞んだ層が確認できる。観測期間中この高度に比較的安定してこの層が確認できる。これらの層は 黄砂によりできていると考えられる。黄砂は中国の黄河流域やゴビ砂漠から飛んで来る黄色く細かい砂によって起こる現象である。この地域は黄色い砂が 400m 以上堆積しており、冬の間は凍っている。春になると氷が解け、さらに春先は雨が少ないため砂がまきあげられその砂が日本まで飛んで来る。図 16 を見ると比較的厚く霞んだ層が確認できる。この霞みは赤外線カメラでは確認できていない。この図から 晴れているように見えても 実際には霞んでいる日があることが分かり、大気モニターの重要性が確認できる。

これらの図から 天気が良ければ 非常に高い統計精度で大気透明度が測定できていることが分かる。例えば 図 11 で 検出機から高度 10km までの透過率を天頂方向に積分し透過率を求めると 73.27 % になる。この時 統計誤差は 0.05 % である。同様に、図 13 で天頂方向 10 km までの透過率は 57.91% で統計誤差は 0.07 % である。ただし、それぞれの測定に 約 20 分かかる。

図 20 から 37 に 観測期間中の測定結果を載せておく。

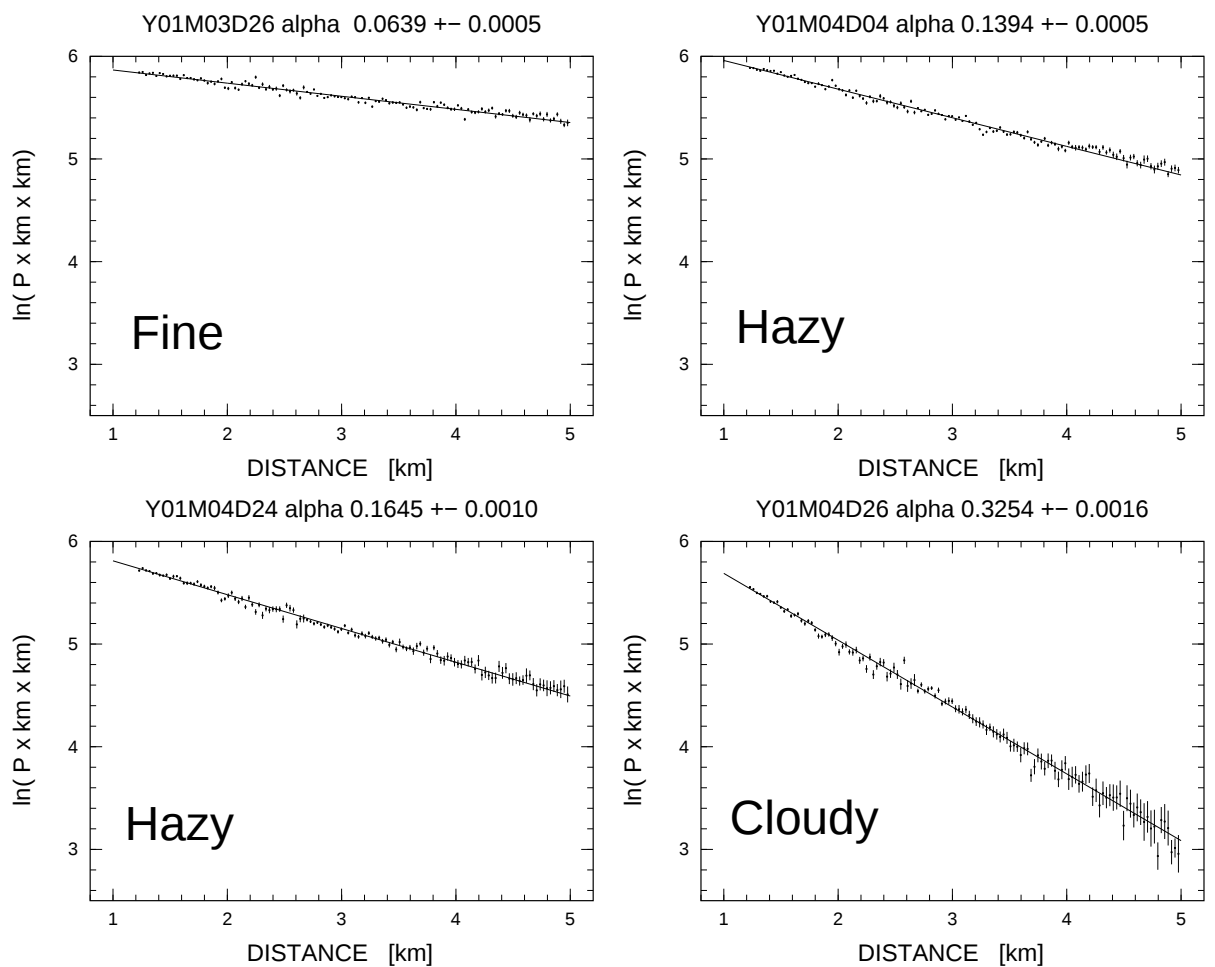


図 8: 水平方向での測定。LASER から 1.2 から 5 km までをプロットしている。直線は一次式でフィットした結果。大気が一様なとき、傾きが α に相当する。4 通りの例を示して、それぞれの傾きから求められた α をタイトルに示している。

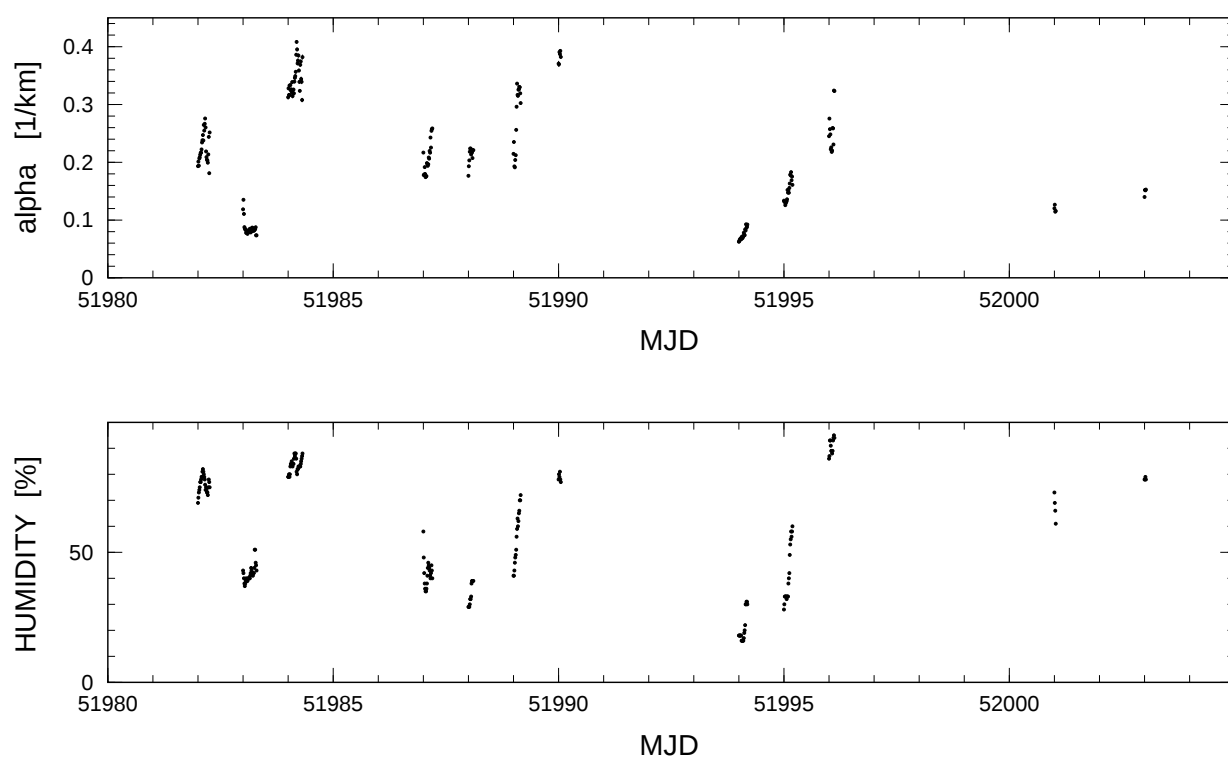


図 9: 上図は水平方向の測定により推定された α 。下図は同じ時刻の湿度。湿度のわずかな変化に α が追従しており、高精度で測定できていることが分かる。

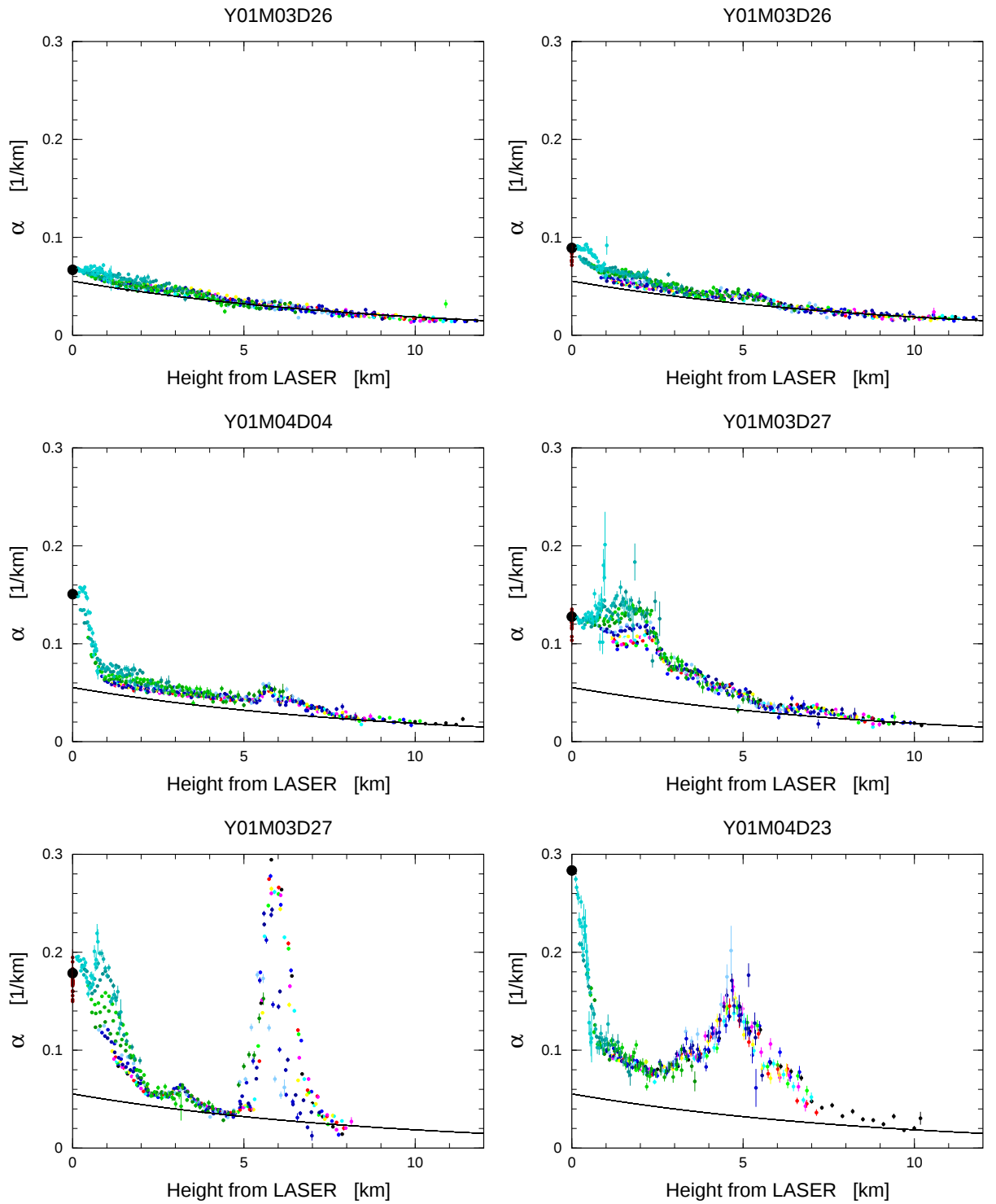


図 10: 横軸に高度、縦軸に推定された α をとり各天頂角毎に色を変えてプロットしている。実線は Rayleigh 散乱から期待される値。高度 0 の黒点は水平方向の測定から推定された値。6 通りの例を示している。左上がもっとも天気の良いときの結果。左下の図では、高度 6km 付近に雲があり それより高いところの大気を測定できていない。このため 初期条件が決まらず 正しい絶対値が求まっていない。

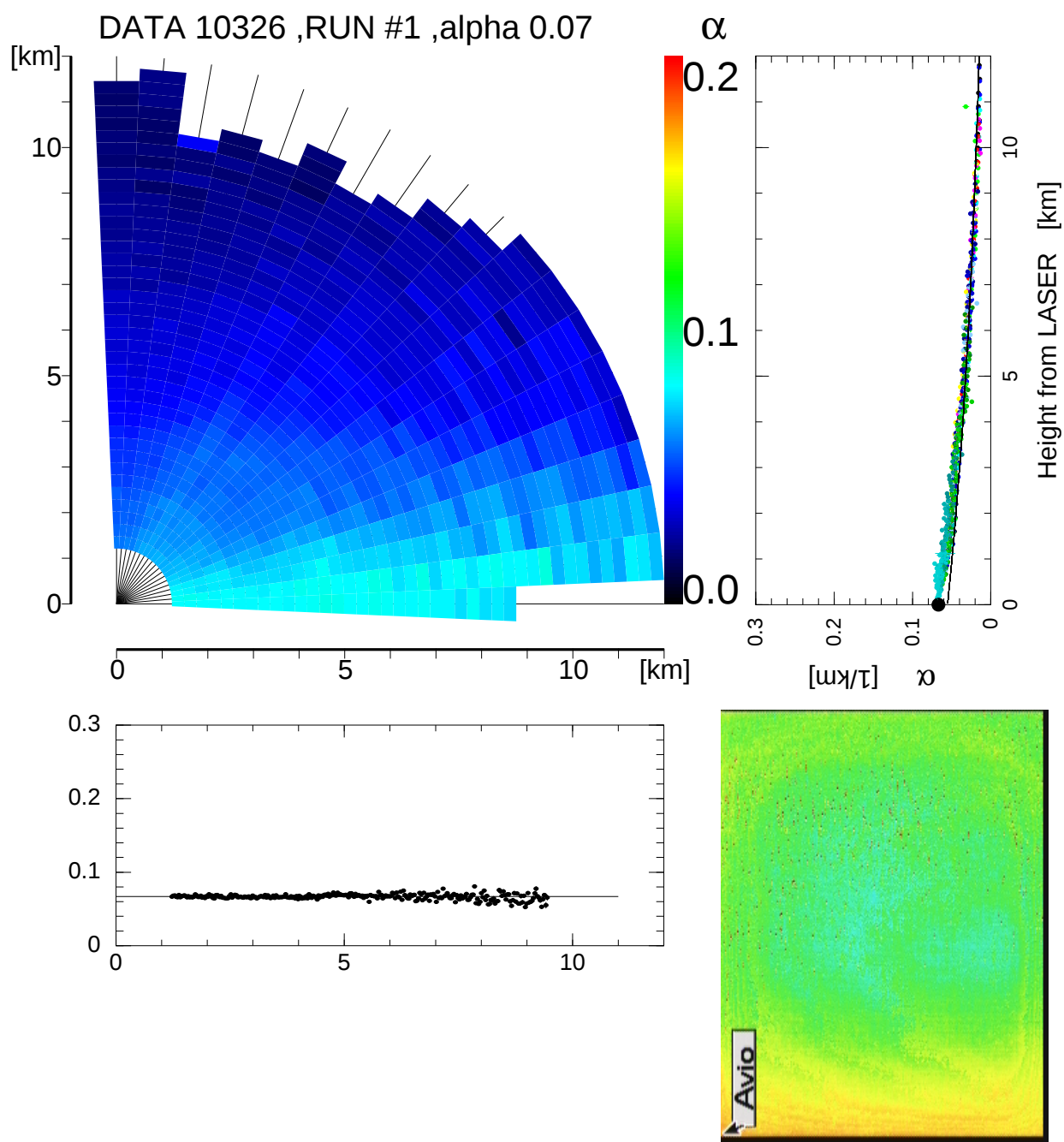


図 11: 消散係数 α の測定例。左上の図は 推定された α の 2 次元マップ。12 km 以内の結果が示されている。右上の図は 各天頂角毎に推定された α を高さの関数でプロットしている。各天頂角毎に色を変えている。高さ 0 の黒点は水平方向の測定で得られた α 。実線はレーリー散乱から期待される α を示している。左下の図は 水平方向の測定結果。右下の図は赤外線カメラにより撮影されたイメージ。この図は最も天気の良い時の図で、測定範囲で大気が一様であったことが分かる。

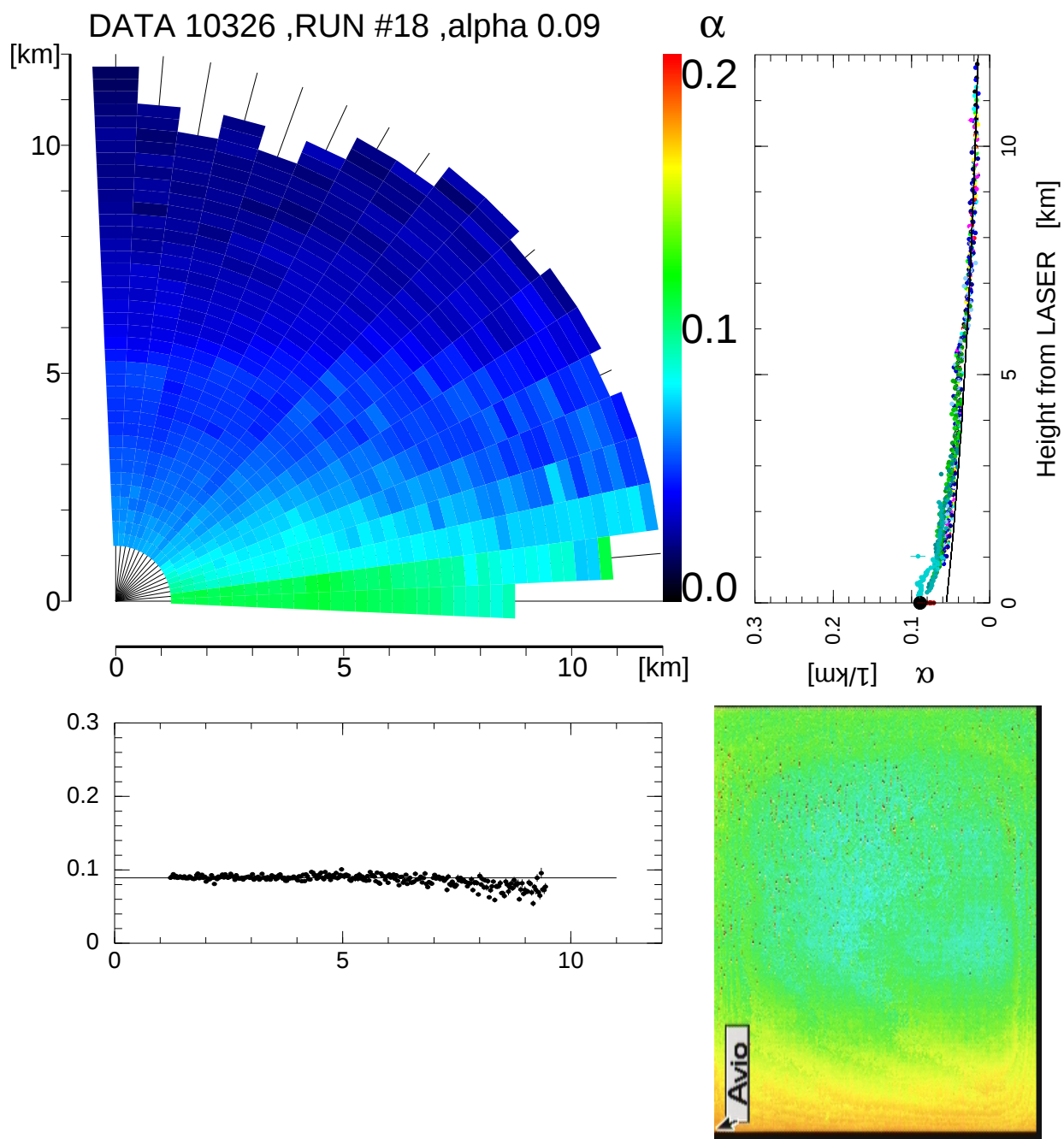


図 12: 前図と同じ日で 6 時間後の測定結果。前図に比べると大気がわずかに霞んできている。

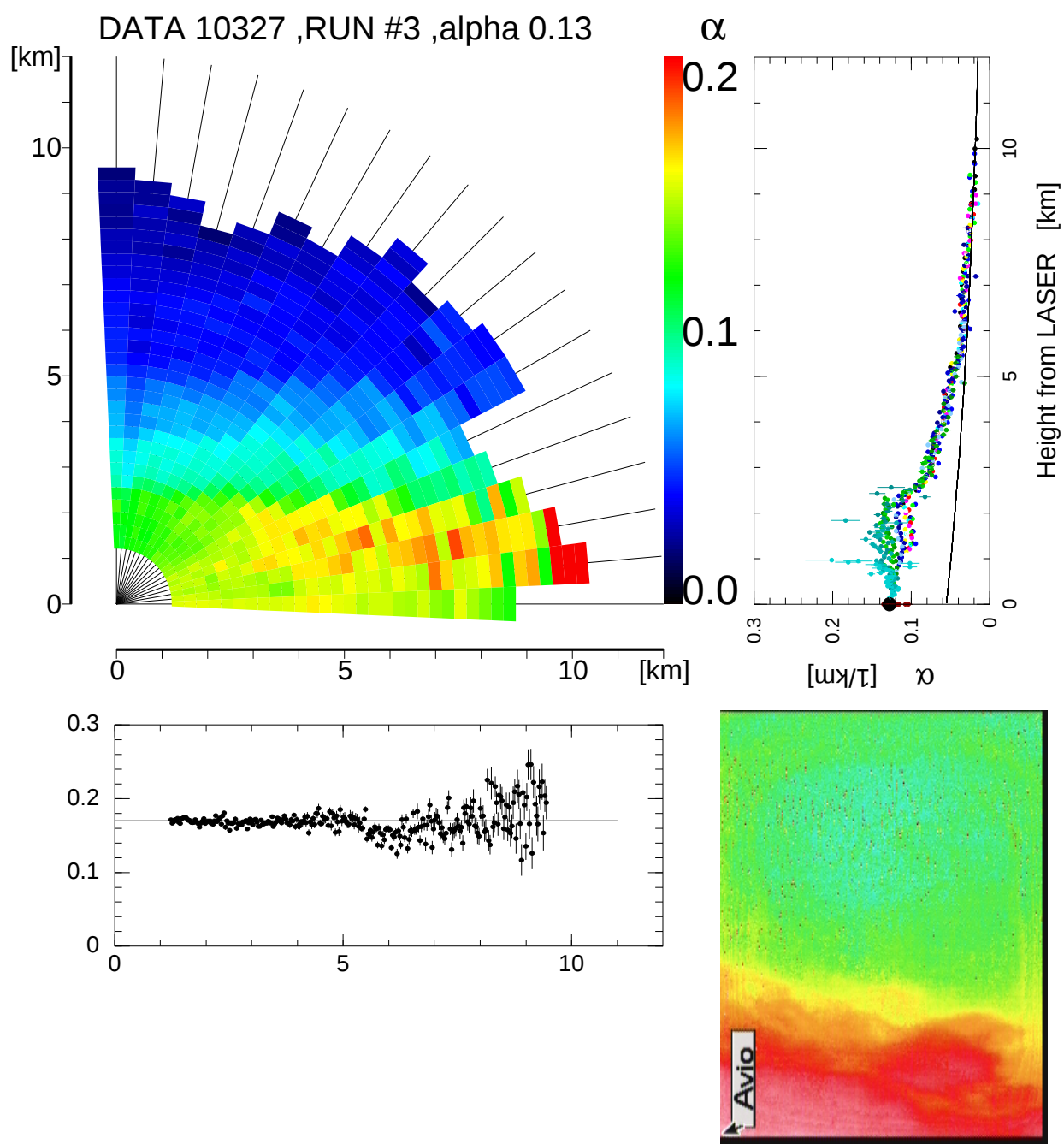


图 13:

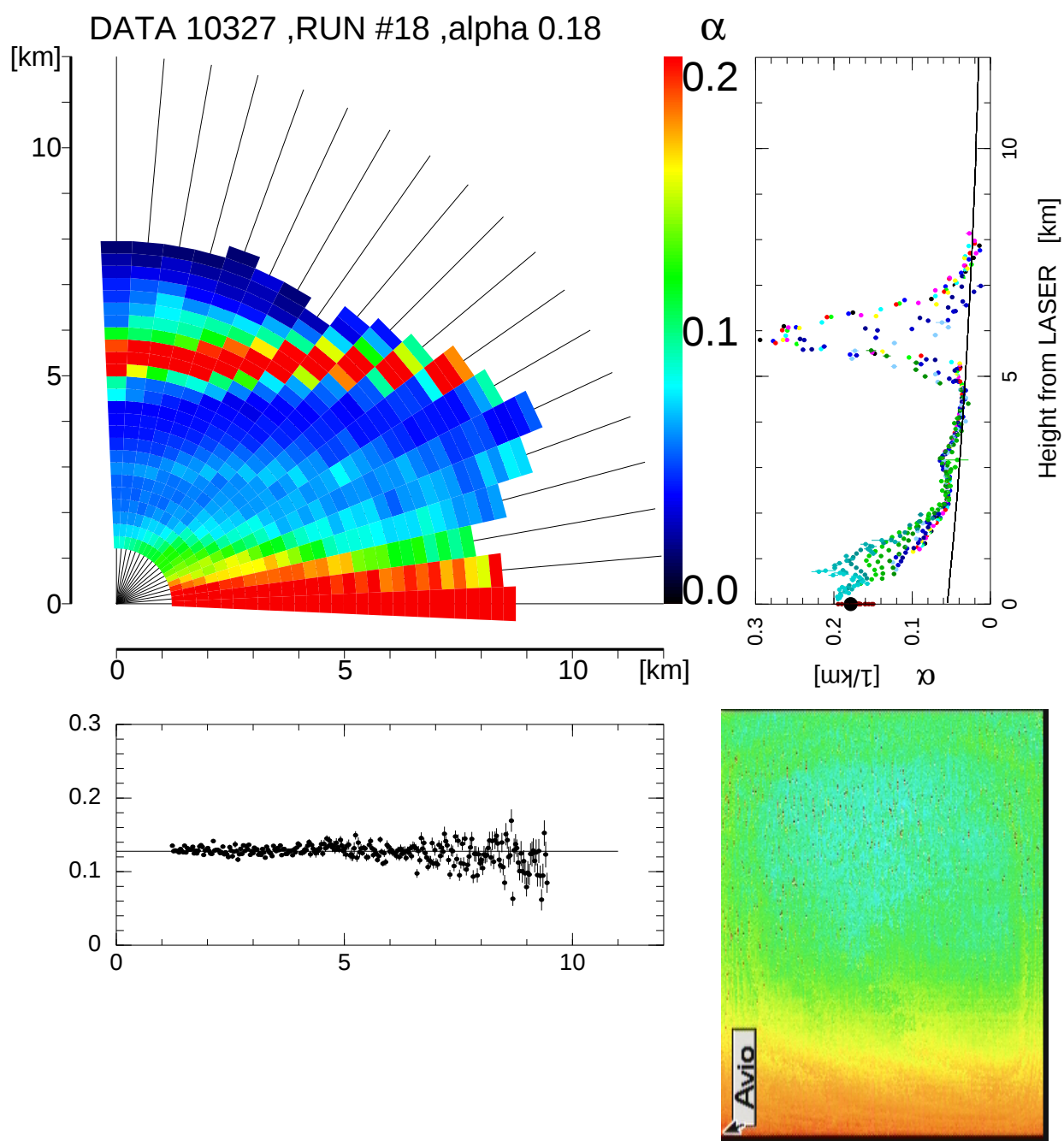


图 14:

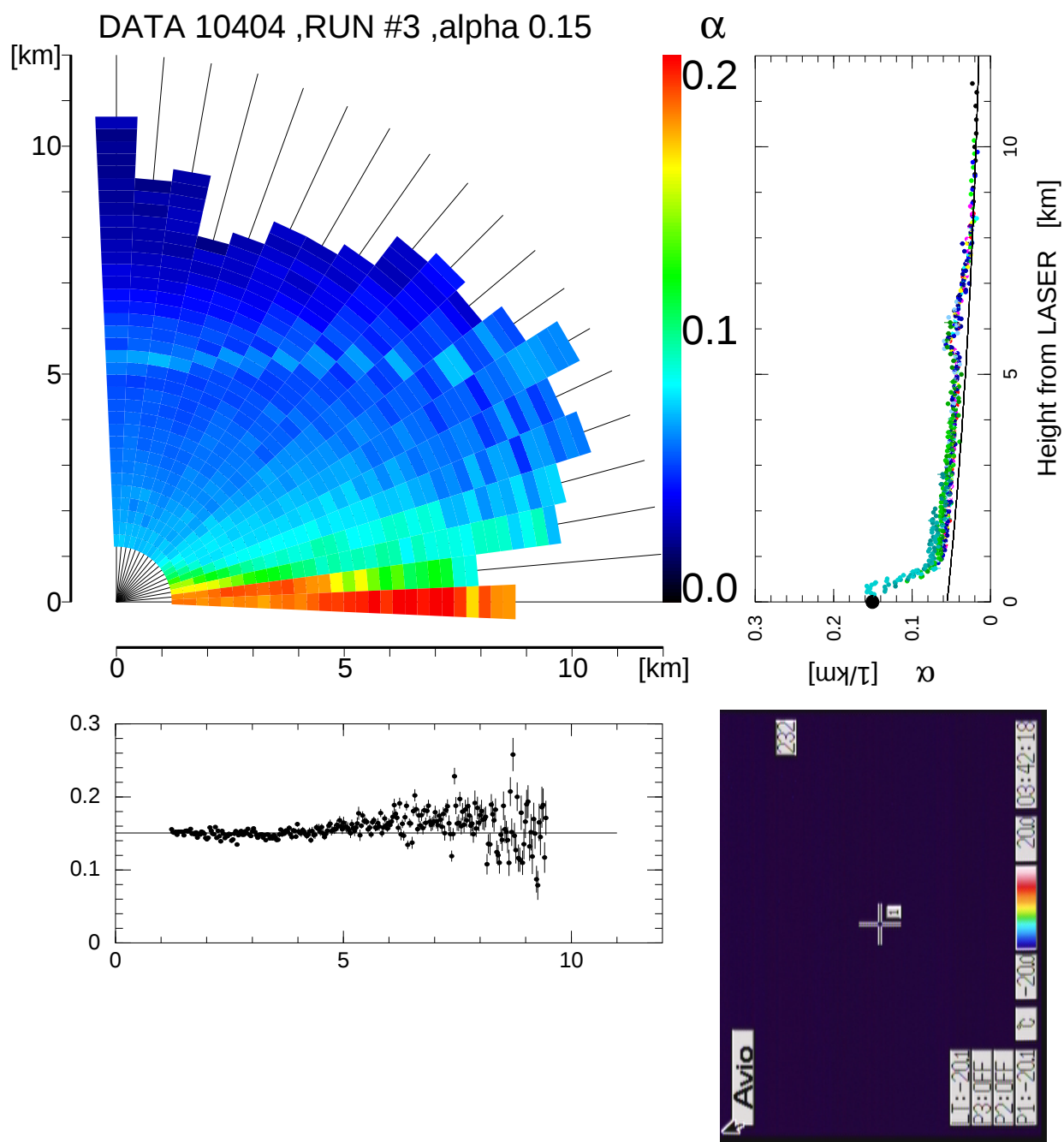


図 15: 晴れた日の典型的な例。低い高度でミー散乱の影響がはっきりとみられる。5 km 付近に薄く霞んだ筋が見られる。水平方向で一様性がわずかに崩れている。

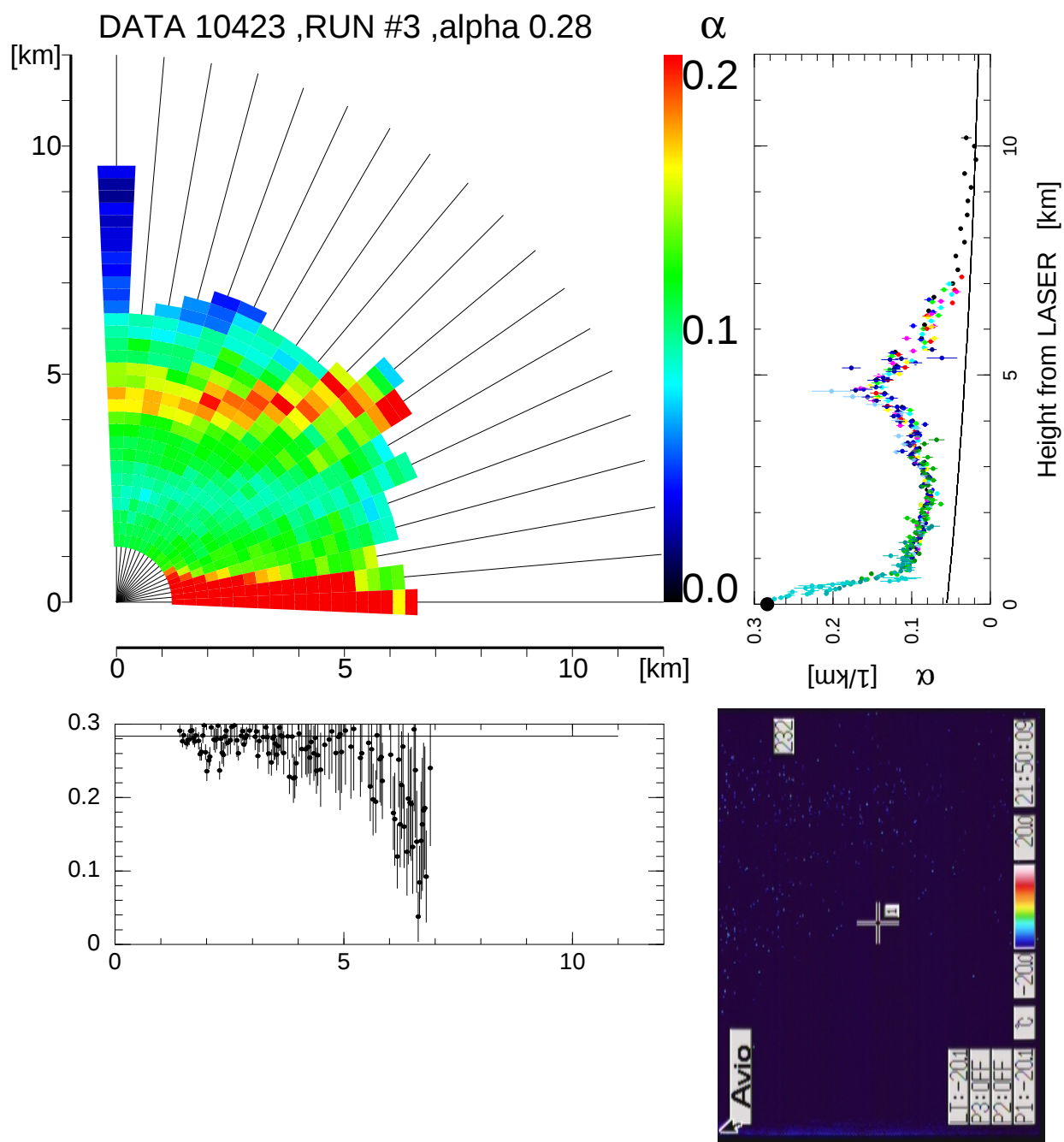


図 16: 霞んだ日の例。大気が濁っているが、赤外線カメラには写っていない。

7 シミュレーション

klett の方法により 推定された透過率が どの程度 実際の大気の状態を再現しているか調べるために 単純な MC シミュレーションを行なった [5]。このシミュレーションでは 大気密度をスタンダードモデルで計算し、それによりレーリー散乱による後方散乱量を計算している。さらにミー散乱による L_M, H_M を変えることにより単純な大気モデルを作り、検出される後方散乱光の量を計算している。図 17 に 大気モデルの例と観測される後方散乱光の量を示す。図では 高度 1.5 km にある装置で 仰角 10 度に LASER を打った場合の結果を示している。

このシミュレーションにより生成された LIDAR のデータから Klett の方法を使い消散係数 α を推定した。その再 実際のデータ解析と同じように、遠方をレーリー散乱のみと仮定し、 $k=0.7$ の場合と、検出機と同じ高度の α が分かっている場合の 2 通りを計算した。図 18 に L_M と H_M を変化させた時の 実際の α と推定された α を示す。 H_M が大きいとき 遠方でミー散乱の影響が大きくなるため 推定される α のずれが大きくなるが、それ以外の場合は入力された大気モデルを良く再現できていることが分かる。

このシミュレーションから、大気モデルに対する Klett の方法から生じる系統誤差を調べた。図 19 は LASER の仰角を 10 度とし、検出機から 30 km 遠方までの透過率と減衰長を各大気モデル毎に計算し、推定された値とのずれを示している。最も典型的な値である、 $L_M = 20km, H_M = 1.2km$ の時 減衰長は約 0.5 % の精度で推定されており klett の方法が十分有効であることが分かる。この系統誤差は 解析方法を改善することにより小さくできる。

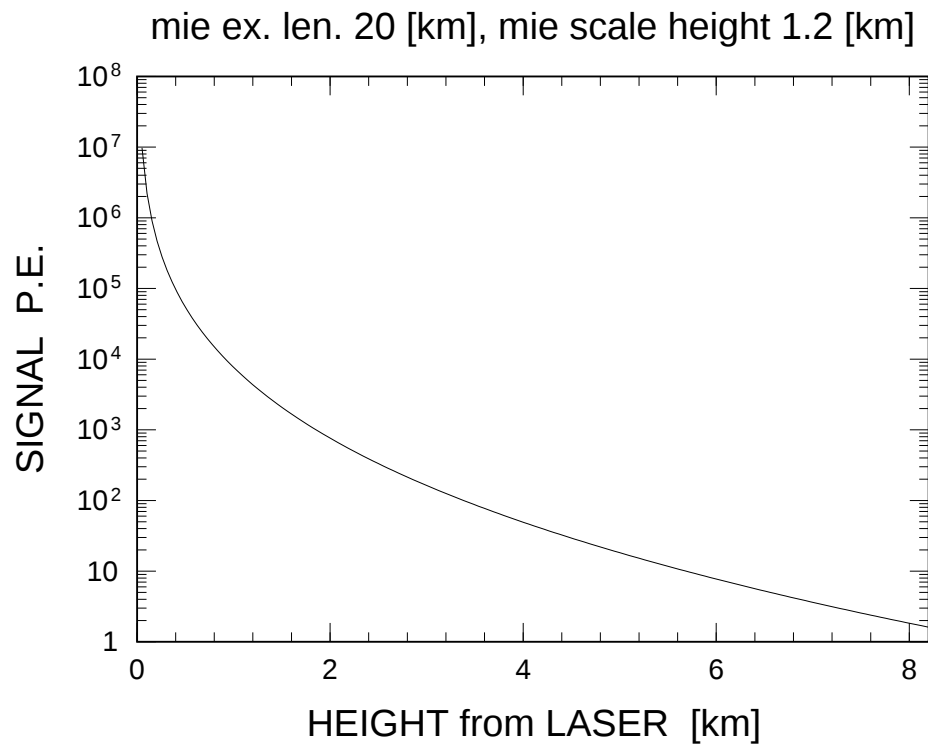
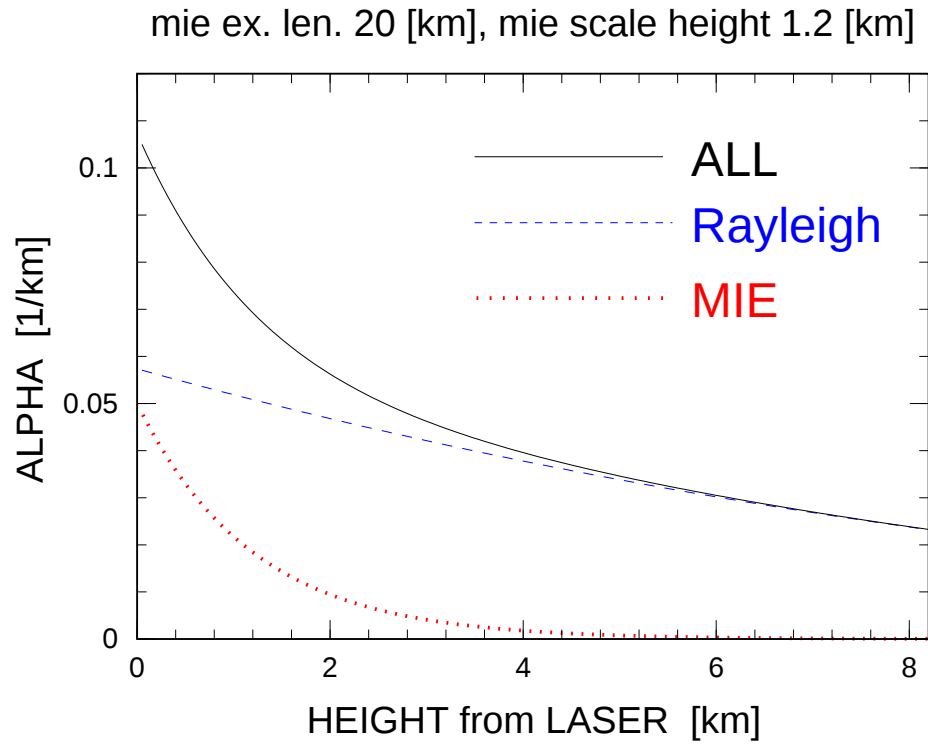


図 17: シミュレーションに入力した 大気モデルの例。上図は $L_M = 20\text{km}$, $H_M = 1.2\text{km}$ の時の消散係数。赤線がミー散乱、青線がレーリー散乱、黒線が合計。下図は観測される後方散乱光の量を示している。

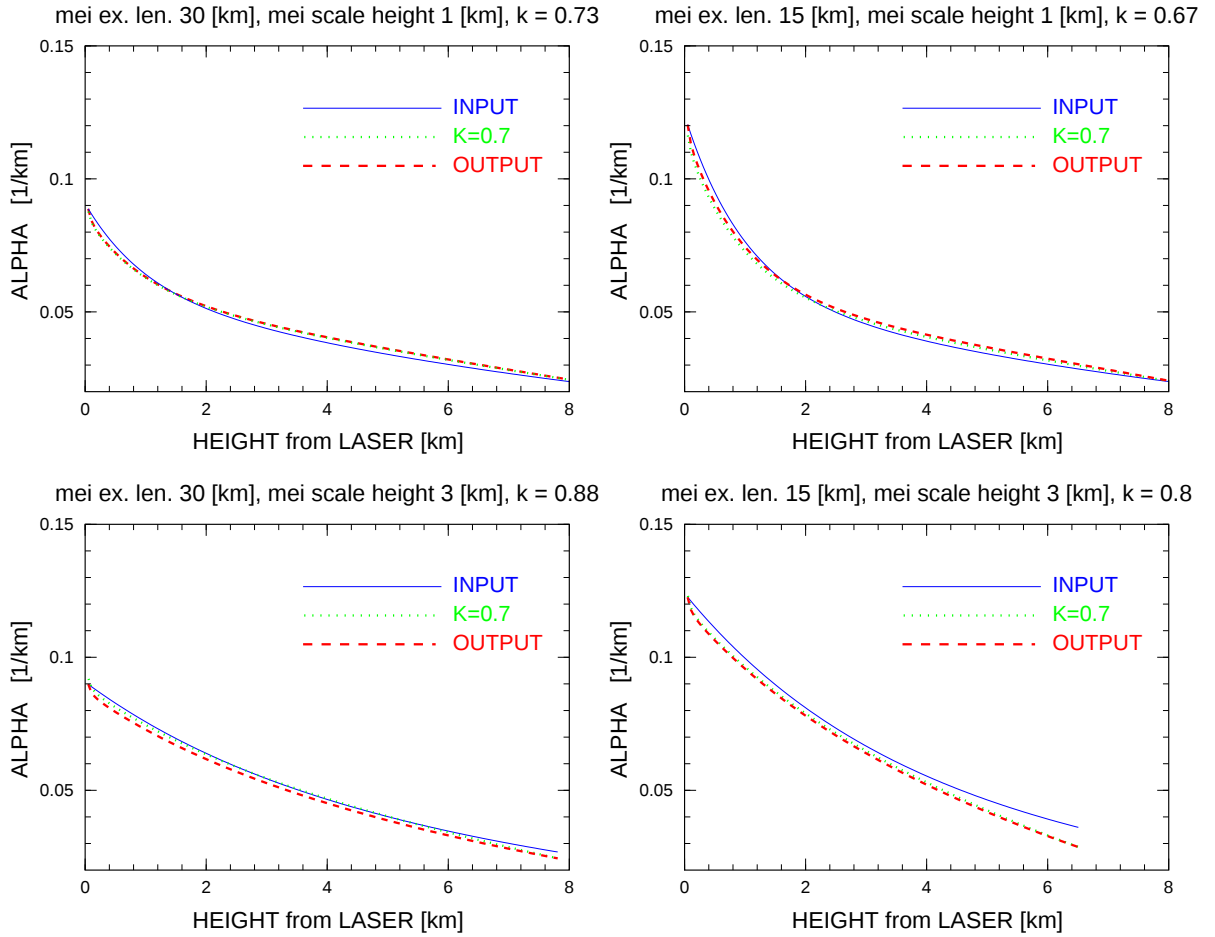


図 18: シミュレーションに入力した大気モデルと、検出された後方散乱光量から推定された α 。 L_M, H_M を変えた場合を示している。仮定した L_M と H_M をそれぞれの図のタイトルに示している。青線が真の α の値。緑線は $k=0.7$ と仮定したときに推定される値。赤線は高度 0 の α が分かっているとした時に推定される値。この時決定される k の値は title に示している。遠方をレーリー散乱のみで近似しているため H_M が大きくなると、ずれが大きくなるがそれ以外では良く再現できている。

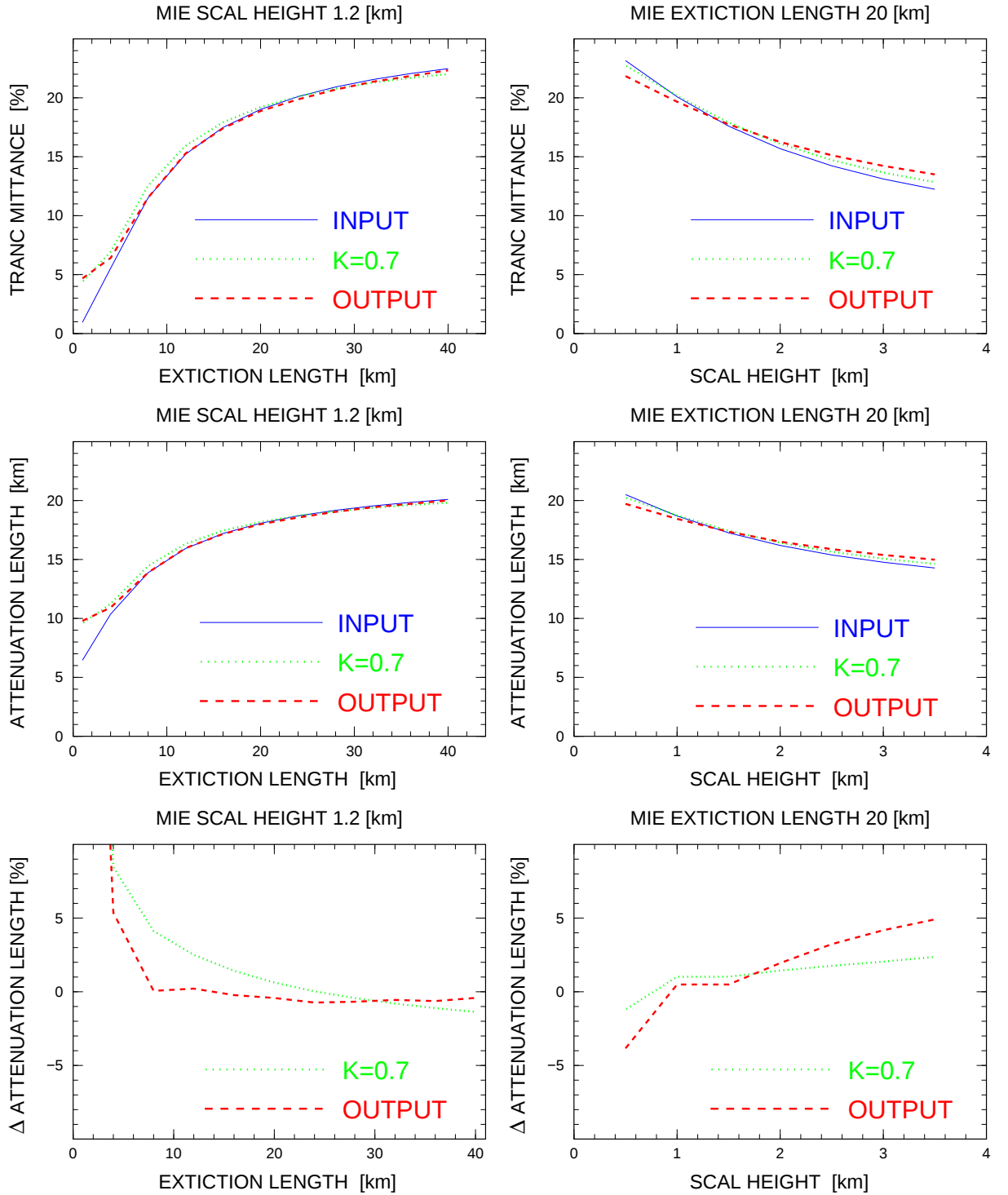


図 19: 仰角 10 度で 30 km 遠方を観測したときの推定される大気透明度の誤差。左の図は $H_M = 1.2\text{km}$ とし、 L_M を変えたとき。右の図は $L_M = 20\text{km}$ とし、 H_M を変えたとき。青線が真の値。緑が $k=0.7$ と仮定したとき、赤が高度 0 の α が分かっているとき。上図は透過率、中図は平均の減数長、下図は推定された減衰長の誤差を示している。 $L_M = 20\text{km}$, $H_M = 1.2\text{km}$ の時 約 0.5 % の精度で推定できている。

8 Summary and Futur Plan

山梨県明野村にある明野観測所で、大気モニター装置を開発した。この装置は、全天任意の方向を測定できる LIDAR で、最大エネルギーが 7 mJ のレーザーと口径 16 cm の放物面鏡を搭載している。

この装置を使い、明野観測所周辺の大気透明度を測定した。測定には klett の方法を使った。 $\beta = \text{const.} \times \alpha^k$ を仮定し、10 km 以上の高度にある大気の α をレーリー散乱から期待される値で近似し、近傍を水平方向の測定から求めることにより、全天で α を推定する方法を開発した。観測の結果、天気が良い時、鉛直方向 10 km までの大気透明度を 0.1% 以下の統計精度で決定することができた。

さらに、この解析方法による系統誤差を調べるため簡単なシミュレーションを行なった。典型的な砂漠の大気は ミー散乱のスケールハイト H_M が 1.2 km で水平方向の減衰長 L_M は 20 km である。この時シミュレーションから得られた解析方法による減衰長の系統誤差は 0.5% と十分な精度であった。

この観測で最も大きな系統誤差となるのは初期条件として 10 km 以上遠方をレーリー散乱のみで近似している点である。実際に ミー散乱の影響が無視できるところまで測定するためには少なくとも 20 km 以上の高度が必要であろう。このためより口径の大きな鏡や強度の高い LASER が必要である。鏡の反射率や PMT の感度、射出される LASER の強度等装置定数に含まれるものはこの解析では系統誤差を生まない。しかし、4 桁以上にわたる観測で PMT の直線性がどこまで保証されているか考慮する必要がある。またこの解析では光の多重散乱による影響を無視している。観測精度を上げるためにはこれらから生じる系統誤差を求めることが課題となる。

この測定結果から Telescope Array の大気モニターに要求される装置を考える。S/N は beam 強度と鏡の口径それに観測時間の平方根に比例する。今回の測定結果をみると $5\text{mJ} \times 16\text{cm} \times \sqrt{20\text{min}} = 358 [\text{mJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{min}^{1/2}]$ の装置で 10 km 以内の大気が測定できることになる。50 km 先まで測定するためには $358 \times 5^2 = 8950 [\text{mJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{min}^{1/2}]$ の性能が必要になり、観測時間を 2 分に短縮しようとする約 $6330 [\text{mJ} \cdot \text{cm}]$ の性能が必要となる。つまり口径 1m の鏡を使った場合 63 mJ の LASER が必要になり、3m 口径の鏡だと 21mJ の LASER が必要になる。これらの結果を考慮しながら Telescope Array のための LIDAR system を開発し、このレポートで報告した方法で観測すれば、十分な精度で大気透明度を測定することができるであろう。

参考文献

- [1] L.R.Wiencke, et all : NIM A 428,593-607(1999)
- [2] W.Vieze, J.Oblanas, R.T.H.Collis:SRI report AFCRL-TR-73-0708(1973)
- [3] J.D.Klett : Appl.Optics,20,211-220(1981)
- [4] F.G.Fernald : Appl.Optics,23,652-653(1984)
- [5] John A.J.Matthews : private communication(2001)