

多波長ライダーと地上計測装置による対流圏のエアロゾル計測  
Measurement of tropospheric aerosol using multi-wavelength lidar  
and ground observing system

眞子直弘<sup>1</sup>、齊藤隼人<sup>1</sup>、馬淵佑作<sup>1</sup>、太田章馬<sup>1</sup>、小山護哲<sup>2</sup>、中郷 敦<sup>2</sup>、野口由太郎<sup>2</sup>、  
竹内延夫<sup>1</sup>、椎名達雄<sup>2</sup>、久世宏明<sup>1</sup>  
N. Manago<sup>1</sup>, H. Saito<sup>1</sup>, Y. Mabuchi<sup>1</sup>, S. Ohta<sup>1</sup>, M. Koyama<sup>2</sup>, A. Nakago<sup>2</sup>, Y. Noguchi<sup>2</sup>,  
N. Takeuchi<sup>1</sup>, T. Shiina<sup>2</sup>, H. Kuze<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学環境リモートセンシング研究センター

<sup>2</sup> 千葉大学大学院融合科学研究科

<sup>1</sup>Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

<sup>2</sup>Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

Abstract

We have been developing the Atmospheric Data Collection Lidar (ADCL), a lidar system aimed mainly to observe aerosols/clouds in the troposphere by means of stereoscopic and continuous observations. The system is composed of three major units: (i) Multi-wavelength lidar unit which measures size distribution and non-sphericity of scatterers, (ii) PPI (Plan Position Indicator) unit which makes measurement on a rotational plane, and (iii) Ground aerosol measurement unit which measures optical properties of aerosols near the ground directory and thus provide the ground truth. Such an accumulative measurement with this system enables us to characterize aerosol properties from the ground layer in which the highest aerosol concentration is expected.

1. はじめに

千葉大学環境リモートセンシング研究センター (CEReS) は、リモートセンシング技術とその環境への応用に関する研究を行う共同利用・共同研究拠点である。その共同利用施設の一つとして、従来から運用を行ってきた多波長ライダーシステム[1,2]および可搬型ライダーシステム[3,4]の更新を進めている。本講演では、この新しいライダーシステムである ADCL (Atmospheric Data Collection Lidar) の概要について紹介する。

ライダーは地球温暖化の予測精度向上や衛星データの大気補正等に不可欠なエアロゾルおよび雲の光学特性を測定するための強力な手段である。本システムはとくに、衛星リモートセンシングデータの解析や、地上付近の生活圏における大気汚染で問題となるエアロゾルが多く存在する対流圏に重点を置いている。ADCL は、エアロゾルと雲の複合的リモートセンシング計測を行うため、(i) 散乱体の粒径情報や形状が計測可能な多波長計測装置、(ii) 面的・立体的な計測が可能な PPI (Plan Position Indicator) モード計測装置、(iii) ライダー計測の地上校正値を提供する地上エアロゾル計測装置の 3 要素で構成されている。こうした工夫により、地上からの積み上げ計測を常時可能とすることを目的としたシステムである。

ライダーデータの一般的解析方法の一つとして、エアロゾルの量が既知である校正点を出発点としてライダー方程式を逐次的に解いていく Fernald 法がある。通常、高層大気のエアロゾルはほとんど無視できるため、鉛直パスのライダーでは十分遠方を校正点にとることができる。しかしながら、ライダーで雲を観測する場合は最初からこのような仮定が成り立たないため、校正点を遠方にとることはできない。ADCL では、鉛直パス後方散乱ライダーによる観測と同時に地上エアロゾル計測装置で地上校正値を取得し、スラントパス後方散乱ライダー/バイスタティックイメージングライダーで地上と上空の橋渡しをすることで遠方に校正点を取れない場合の解析をも可能としている。また、通常の Mie ライダーに Raman ライダー、偏光ライダー、高分解能スペクトルライダー (high-spectral resolution lidar, HSRL) を加えた多角的システム構成により、ライダー方程式による解析に必要なライダー比を常時取得して定量的なエアロゾル解析を実現するとともに、エアロゾルと雲の相互作用の解明を目指している。また、PPI 装置による平面的なエアロゾル分

布情報は、地上測器データによる衛星データの大气補正や長光路差分吸収分光法 (DOAS 法) による大气汚染物質計測データにたいして有用な付加的情報を提供できる。

## 2. 多波長計測装置

多波長計測装置は雲やエアロゾルの高度プロファイル、粒径および形状を測定するための装置であり、可視領域における (i) Mie ライダー、(ii) Raman ライダー、(iii) 偏光ライダー、(iv) 高分解能スペクトルライダー (HSRL)、紫外領域における (v) Mie ライダー、(vi) Raman ライダー、近赤外領域における (vii) Mie ライダーの計 7 種類の後方散乱ライダーと、紫外、可視領域における (viii) バイスタティックイメージングライダーで構成されている。可視の後方散乱ライダーはスラントパス、他は鉛直パスのレーザー光を観測する。Mie ライダー、Raman ライダー、偏光ライダーからはそれぞれエアロゾルの後方散乱係数、ライダー比 (消散係数/後方散乱係数)、偏光解消度 (エアロゾルの形状) の情報が得られる[5]。高分解能スペクトルライダーは Rayleigh 散乱と Mie 散乱を分離して測定することが可能であり、Raman ライダーの信号取得が困難な昼間におけるライダー比を得ることができる[6,7]。スラントパス後方散乱ライダーやイメージングライダーは、鉛直パスの後方散乱ライダーでは望遠鏡視野角とレーザー光のオーバーラップ制限のために取得困難な地上付近の情報を補う役割を果たす。さらに、PPI による水平面内に近いエアロゾル観測によって、エアロゾル分布の均一性に関する情報を得ることができる。

鉛直パス用のレーザー装置にはフラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザーを 2 台 (Continuum Surelite I-20: 1064, 355 nm, 20 Hz, Continuum Surelite I-532-10: 532 nm, 10 Hz) 使用し、355、532、1064 nm の各波長のレーザー光を 10 または 20 Hz で射出する。各波長における散乱光は、それぞれ独立した望遠鏡で取得される方式を採用している (Fig. 1)。これにともなって、各波長の最終送信ミラーには PC 制御可能な 2 軸の自動アライメント調整機構を装着し、レーザー射出方向が定期的に自動調整されるようになっている。検出器部分はスラントパス、PPI 装置を含めてほぼ同一の構成としてコンポーネント化されている。

後方散乱ライダーの受信系は対象の信号強度によって口径の異なる 6 台の望遠鏡 (Meade LX200 および Raymetrics WSU) で構成されている (Table 1)。受信光は半値全幅およそ 1.3 nm の干渉フィルターで背景光が除かれ、光電子増倍管 (浜松ホトニクス H10304) で電気信号に変換された後、トランジェントレコーダ (Licel TR20-160) によって積算される。受信系前段のフリップミラーを切り替えて受信光を CCD カメラに導き、レーザーの軌跡を見ながらアライメントを行うこともできる。後方散乱ライダーの送受信系は、CEReS 研究棟の最上階 (5F) 観測室に設置される (レーザー本体は 4F に設置)。一方、レーザーの射出点から約 60 m 離れた地点には

Table 1. Main specifications of the multi-wavelength measurement unit and the PPI-mode measurement unit (receiver)

Lidar Type	Direction	Wavelength (nm)	Telescope (cm)	Hamamatsu PMT
UV Mie	vertical	355	25	H10304-00
UV Raman	vertical	355, 387, 408	35	H10304-00
VIS HSRL	vertical	532	25	H10304-20
VIS Raman	vertical	532, 607	35	H10304-20
VIS Polarization	vertical	532	30	H10304-20
NIR Mie	vertical	1064	30	R316-02
VIS Mie	slant	532	30	H10304-20
UV Mie	PPI	349 nm	30	H10304-20

CMOS カメラ(浜松ホトニクス ORCA-Flash2.8)を設置し、バイスタティックイメージングライダーとして利用する。

スラントパス用のレーザー装置には半導体励起 Nd:YAG レーザー (Spectra-Physics Explorer 532-2Y: 532 nm, 200 mJ, 1-60 kHz)を使用し、波長 532 nm のレーザー光を 1~3 kHz で方位角北側、仰角 25~35 度方向に射出する(Fig. 2)。レーザー光の送受信系は鉛直パスとほぼ同様であるが、信号の積算には光子カウンティング用スケーラー (Stanford Research SR430)を用いる。この装置は CEReS の最上階に設置される。

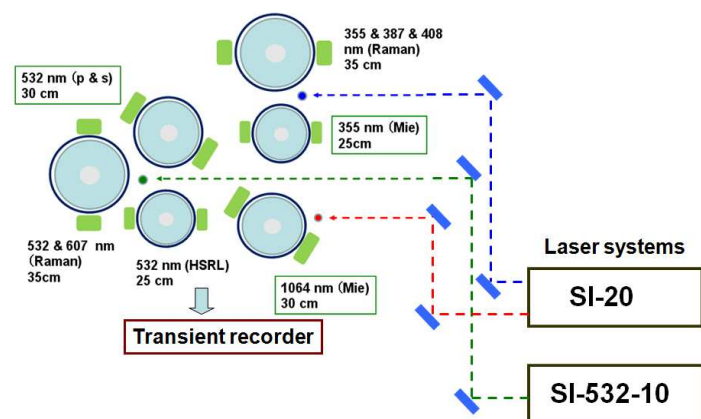


Fig. 1 Multi-wavelength lidar unit

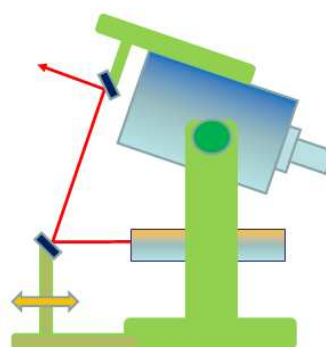


Fig. 2 Slant-path unit

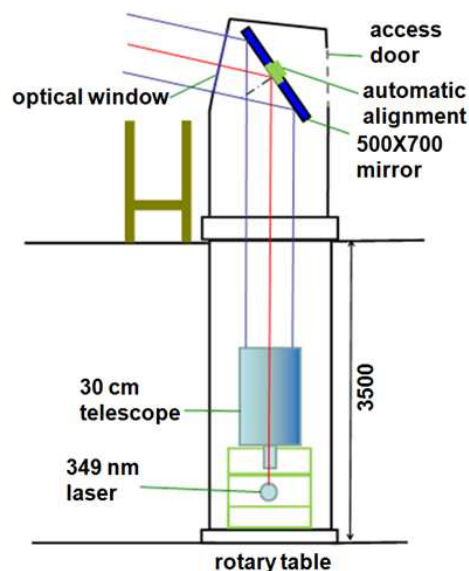


Fig. 3 PPI unit

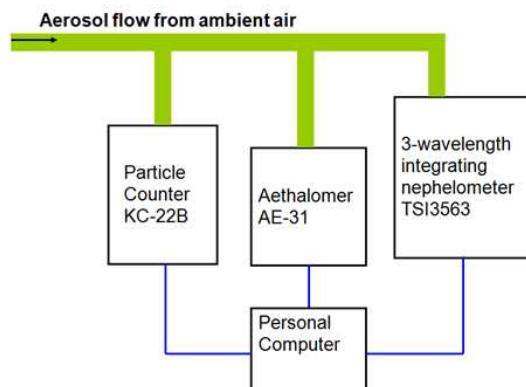


Fig. 4 Aerosol measurement unit

### 3. PPI モード計測装置

PPI モード計測装置は雲、エアロゾルの面的・立体的な計測を行う装置であり、レーザー送信系と受信系を回転台に載せることにより視野を水平方向に 360 度回転できるようになっている (Figure 2)。角度 1~5 度ごとに回転を止めて観測を行い、10~20 分で全方位の観測を行うことができる。レーザー装置には半導体励起 ND:YLF レーザー (Spectra-Physics Explorer 349: 349 nm, 60 mJ, 1-5 kHz)を使用し、波長 349 nm のレーザー光を 1~3 kHz でほぼ水平方向に

射出する。レーザー光の送受信系は多波長計測装置のスラントパスとほぼ同様のものを用いる (Table 1)。この装置は CEReS 研究棟と道路を隔てた工学系総合研究棟の最上階 (9F) 観測室に設置される。

#### 4. 地上エアロゾル計測装置

地上エアロゾル計測装置はライダー計測の地上校正値を提供することを目的にしており、(i) パーティクルカウンタ (リオン KC-22B)、(ii) エーサロメータ (Magee Scientific AE-31)、(iii) 3 波長ネフェロメータ (TSI Model 3563) の 3 種類の装置で構成されている (Table 2)。パーティクルカウンタ、エーサロメータ、3 波長ネフェロメータからはそれぞれ粒径分布、吸収係数、散乱係数の情報が得られる。

Table 2. Main specifications of the ground aerosol measurement unit

Equipment	Main specifications
Particle counter (Rion KC-22B)	Size classification: 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 $\mu\text{m}$
Aethalometer (Magee Scientific AE-31)	Wavelength: 370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm
Nephelometer (TSI Model 3563)	Wavelength: 450, 550, 700 nm (Bandwidth 40 nm)

#### 5. まとめ

千葉大学環境リモートセンシング研究センターで設置を進めている大気データ取得用地上ライダーシステム (ADCL) について紹介した。このシステムの主要ターゲットは対流圏に存在する雲とエアロゾルの観測であり、多波長計測装置、PPI モード計測装置、地上エアロゾル計測装置で構成されている。本システムは 2011 年秋頃から観測を開始する予定である。

#### 参考文献

- [1] H. Kinjo et al., "Calibration of the Lidar Measurement of Tropospheric Aerosol Extinction Coefficients," *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, 293-297 (1999)
- [2] M. Yabuki et al., "Determination of Vertical Distributions of Aerosol Optical Parameters by Use of Multi-Wavelength Lidar Data," *Jpn. J. Appl. Phys.* 42, 686-694 (2003).
- [3] N. Lagrosas et al., "Observation of boundary layer aerosols using a continuously operated, portable lidar system", *Atmos. Environ.*, 38, 3885-3892 (2004).
- [4] G. Bagtasa et al., "Correction in aerosol mass concentration measurements with humidity difference between ambient and instrumental conditions", *Atmos. Environ.*, 41, 1616-1626 (2007)
- [5] A. Ansmann, et al., "Combined raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio," *Appl. Phys. B55*, 18-28 (1992).
- [6] J. Hair, D. A. Krueger, and C. Y. She, "High Spectral Resolution Lidar at 532 nm for Simultaneous Measurement of Aerosol and Atmospheric State Parameters," *Nineteenth International Laser Radar Conference* (1998).
- [7] Z. S. Liu, et al., "Iodine-filter-based high spectral resolution lidar for atmospheric temperature measurements," *Opt. Lett.* 34, 2712-2714 (2009).