

特集 エアロゾル計測 I

エアロゾル計測用ライダーシステム

杉本 伸夫

国立環境研究所環境計測研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Lidar System for Aerosol Measurement

Nobuo SUGIMOTO

National Institute for Environmental Studies, Center for Environmental Measurement and Analysis, 16–2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305–8506

(Received November 30, 2019)

Lidar methods for measuring aerosols are explained. Details of the elastic backscattering lidar system used in the Asian Dust and aerosol lidar observation Network (AD-Net) are presented as well as observation example. The range of lidar-sensitive aerosol particle size and the dependence of the lidar ratio on the particle size are discussed using the Mie-scattering theory. Recent developments in multi-wavelength Raman lidar and high-spectral-resolution lidar are also described.

キーワード:エアロゾル,ミー散乱ライダー,ラマン散乱ライダー,高スペクトル分解ライダー **Key Words**: Aerosol, Mie scattering lidar, Raman scattering lidar, High-spectral-resolution lidar

1. はじめに

エアロゾル計測用ライダーとひとくちに言って も、例えば、計測の対象がローカルな煙突の排煙や 沿道のエアロゾルの拡散なのか,都市スケールの大 気汚染なのか、地域スケールの大気汚染や黄砂の輸 送なのか、気候変動に係るエアロゾルの光学特性な のか.成層圏エアロゾルなのかによって計測システ ムは大きく異なる. 計測の対象に加え、計測の目的 によっても必要とされる時間空間分解能、計測精度 が異なり、さらに、設置場所や運用の形態、可能な 保守作業の頻度などの条件もライダー装置の仕様を 決める重要な要素となる.本文では,エアロゾル計 測用ライダーで観測するパラメータやライダーシス テムの基本的な事項について解説するとともに、エ アロゾル計測用ライダーの一例として, 東アジアの 自動観測ライダーネットワーク (AD-Net: Asian Dust and aerosol lidar observation Network) の ライ ダーについて詳しく紹介する.また、ミー散乱ライ ダーが感度を持つエアロゾルの粒径の範囲やライ ダー比(後述)に関する基本的な事項の解説を試み る. さらに、エアロゾルの光学特性の測定のための

多波長ラマン散乱ライダーや多波長高スペクトル分 解ライダーの開発の動向についても解説する.

2. 概 論

2.1 エアロゾル計測用ライダー手法

エアロゾル計測用ライダーとして,装置として最 も簡単なのはミー散乱ライダー(Mie-scattering lidar)である.ミー散乱は光の波長と同じくらいの 球形粒子による散乱で,Maxwellの方程式の厳密解 を与えたGustav Mieの名をとってミー散乱と呼ば れる.ミー散乱ライダーは,弾性後方散乱ライダー (Elastic-backscattering lidar)とも呼ばれる.通常の ミー散乱ライダーでは大気構成分子(窒素,酸素な ど)のレイリー散乱も同時に測定するので,Elastic-backscattering lidarという呼称の方が物理的には 正しいように思われる.(但し,いわゆるレイリー 散乱には回転ラマン散乱も含まれ,またエアロゾル には吸収もあるので厳密に言えば elastic でもな い.)

ミー散乱ライダーによるエアロゾル計測で求めた い基本的な物理量は後方散乱係数と消散係数である が、ミー散乱ライダーで測定されるのはレーザー光 が伝播する間に減衰(消散)を受けた後方散乱信号 のみである.言い換えれば、ライダー信号を表すラ イダー方程式(3.3章)には、後方散乱係数と消散 係数の2つの未知数が含まれるが測定値はひとつし かないので解くことができない.そこで、通常は後 方散乱係数と消散係数の間に比例関係を仮定して解 析を行う.消散係数対後方散乱係数比をライダー比 と呼ぶ.式の上ではS₁と表すのが一般的であるの で、S₁(エスワン)とも呼ばれる.ここで、1は ミー散乱を意味する.後に出てくるが、2はレイ リー散乱に対するものを表す.S₁を仮定してライ ダー方程式を解いて得られたエアロゾルの消散係数 (あるいは後方散乱係数)の分布から汚染状況や大 気の構造を把握することができる.

後方散乱の偏光解消度の測定はミー散乱ライダー の付加的な機能として非常に有用である. 偏光解消 度とは, 偏光(通常は直線偏光)したビームを送信 したときの散乱光の偏光の乱れの度合いで, 散乱体 が球形のエアロゾル(液滴状の大気汚染エアロゾル など)であれば偏光解消度はほぼゼロ, 非球形の黄 砂などでは大きな値を持つ. 従って, 黄砂などの非 球形粒子の検知において大きな威力を発揮する.

エアロゾルの放射特性や組成の解析を目的とする 観測では、消散係数と後方散乱係数を独立に計測す ることが求められる. 大気構成分子の散乱をミー散 乱とは独立に測定し、その減衰項からエアロゾルの 消散係数を求めるのがラマン散乱ライダーや高スペ クトル分解ライダー (high-spectral-resolution lidar (HSRL)) である(第4章). ラマン散乱ライダー では通常,窒素分子の振動ラマン散乱を利用し,高 スペクトル分解ライダーではレイリー散乱を利用す る. 窒素分子の振動ラマン散乱は (Stokes 線の場 合) レーザー波長より 2331 cm⁻¹ だけ低波長側にシ フトするので測定は比較的容易であるが、ラマン散 乱断面積は小さく散乱光が微弱であることが難点で ある. HSRL で利用するレイリー散乱の散乱断面積 はラマン散乱断面積に比べて数桁大きいが. レイ リー散乱とミー散乱はレーザーと同じ中心波長でス ペクトル幅が異なるだけであるので、これらを分離 して測定するためには高分解能の分光素子を必要と する.これが、高スペクトル分解ライダーと呼ばれ る所以である.地球温暖化等に係るエアロゾルの放 射特性を評価するためにはエアロゾルの微物理パラ メータ(単散乱アルベドや粒径)が重要であるが、 これらを推定するためには複数の波長において、消 散係数,後方散乱係数,偏光解消度を測定すること が求められる. 多波長ラマン散乱ライダーや多波長 HSRL はそのための有効なライダー手法である.



エアロゾルには性質が異なる様々な起源のものが あり、実際の大気中ではそれらが混合している.こ れを理解するためにはエアロゾルの種類毎に濃度分 布を測定することが望まれる. 複数の波長における 消散係数,後方散乱係数,偏光解消度の測定はこの ような解析にも利用される. ライダーなどの光学的 な測定では化学組成を求めることは不可能である が、光学的な特性で分類したエアロゾルコンポーネ ント毎に濃度分布を求めることができる.具体的に は、光吸収のない微小(サブミクロン)粒子(硫酸 塩などの大気汚染粒子), 光吸収のない粗大(大き さ1ミクロンオーダー)粒子(海塩など),光吸収 のある微小粒子(煤など、ブラックカーボン),非 球形粒子(黄砂など)の4種類くらいに分類でき る、その他、蛍光を利用するライダーも、エアロゾ ルの種類(生物起源のエアロゾルなど)の推定に有 用な手法となると考えられる、しかしながら蛍光を 発する物質は多く、またエアロゾルの蛍光スペクト ルは一般にブロードであるので,1波長で励起した 蛍光スペクトルのみから物質を特定することは困難 である. そこで、複数のレーザーを用いるなど物質 を特定するための様々な研究が行われている. その 一方で、物質は何であれ吸収した光を蛍光としてど れくらい出すかはエアロゾルの特性のひとつである という捉え方もある¹⁾. なお, エアロゾルの蛍光ラ イダーは、背景光のために昼間は観測が困難であ る.

2.2 ライダーシステムの基本的な事項

ライダーシステムは、送信、受信、信号処理・ データ収集システムから構成される.通常はパルス レーザーを送信し、大気中のエアロゾルで散乱され た光を受信望遠鏡で集光して光電子増倍管(photo multiplier tube: PMT)やアバランシェ・フォトダイ オード(APD)などの高速・高感度の検出器で電気 信号に変換し、信号波形を記録する.送信したパル スが散乱されて受信されるまでの時間(time of flight)から距離が、信号の強度からその距離のエ アロゾル濃度が分かる(送信ビームの減衰も考えな くてはいけないが).受信信号の記録には、トラン ジェントレコーダやデジタル・オシロスコープなど のアナログ・デジタル(AD)変換器を用いる方法 と光子計数法(photon counting)を用いる方法があ る.

エアロゾル計測の場合,分子の吸収を測定する場 合などとは違って特に決まった波長のレーザーを用 いる必要はなく,Nd:YAG レーザーなどの一般的な レーザーが用いられることが多い.但し目に対する 安全性への配慮が必要であるので,特に掃引型のラ イダーでは波長の選定に注意が必要である.目の安 全性については ANSI や JIS の基準がありこれを考 慮する必要がある.さらに空港の周辺などでは,目 に対する安全性の基準を満たしていても目に見える 波長は使えない場合があるので注意が必要である. しかしその一方で,エアロゾルの光学特性を観測対 象とする場合などでは可視域の測定も不可欠であ る.その場合はビーム方向を鉛直上方に限定すると ともに,航空機を検知してレーザーを遮断する安全 装置を用いる方法で安全性を確保するのが妥当であ る.

ライダーの信号強度は、レーザーのパワーと受信 望遠鏡の面積の積に比例する.背景光雑音(太陽光 など)などのない理想的な場合, 雑音はショットノ イズ(光子の統計的な性質による雑音)のみで信号 強度の平方根に比例する。従って、この場合、信号 対雑音比(SN比)は信号強度の平方根に比例する ことになる、パルスライダーには、パルス励起の0 スイッチレーザーを用いたパルスエネルギーが大き く繰り返し数の低いものと、連続波(CW)励起の Qスイッチレーザーを用いたパルスエネルギーは小 さく繰り返し数の高いものがある.後者は,NASA で開発された Micro Pulse Lidar (MPL) で導入され た手法である²⁾. ライダー波形を同じ時間, 繰り返 し積算して測定を行う場合,背景光雑音のない条件 下では得られる信号の SN 比は平均パワー (パルス エネルギー掛ける繰り返し数)で決まるので両者に 差はないが、背景光雑音や熱雑音(赤外の場合)が 無視できない場合には、1ショットの信号強度が高 い方が背景光の影響を受けにくく高い SN 比が得ら れる. MPL において単一波長のレーザーと狭帯域 の受信フィルターが用いられ、受信視野角も非常に 狭く設計されているのは背景光を可能な限り除去す る必要があるためである.

ライダーの送受信には、送受信の光軸を同軸にす る方法(coaxial)と分離して平行にする方法(biaxial)がある.coaxialの場合、受信望遠鏡の中央部 (反射式望遠鏡の場合、副鏡の外側)からビームを 送信するのが一般的であるが、送受信に同一の望遠 鏡を用いる方法もある.coaxial,biaxialいずれの場 合も散乱光を見る効率は近距離で低下する.cの因 子は、幾何学的効率因子あるいは送受信の重なり関 数と呼ばれる.ライダー方程式の中ではY(R)で表 されることもある.重なり関数には、近距離で散 乱体積が視野から外れる効果と近距離からの散乱が ディフォーカスされる効果が関係している.coaxial と biaxial を比べると,送受信の光軸のミスアライ ンメントに対して coaxial の方が影響を受けにくい ので優れているが³⁾,装置の設計が簡単な biaxial 方 式が採用される場合も多い. coaxial で送受信を同 一の望遠鏡を用いる場合,特に偏光解消度の測定を 行う場合には,送受信光をどのように分離するかが 課題になる⁴⁾.

距離分解測定を行うためにパルスレーザーではな くて、変調した CW レーザーを用いるライダー手 法もある、そのひとつが、擬似ランダム変調ライ ダーで, 擬似ランダムコードで周期的に変調した CW レーザー光を送信し、受信信号と変調したコー ドとの相関を計算することでライダー信号波形を得 る⁵⁾. CW レーザーのエネルギーを無駄にしないで 距離分解測定ができるように思われるが、背景光雑 音のない場合には、CW レーザーから単純に(大部 分のエネルギーを捨てて)切り出したパルスを用い た測定と比べて利点が得られない、これは雑音とな る受信光も増やしてしまうためである.しかし, SN 比が背景光雑音で制限されている場合には、お よそランダムコードの要素の数の平方根だけ SN 比 が改善される. 擬似ランダム変調ライダーに似た方 法に, カオス変調ライダーもある⁶⁾. ヘテロダイン 検波では FMCW(周波数変調 CW) ライダーが ハードターゲットの検知ではよく用いられるが、エ アロゾルの計測の例はあまりないようである.

以上はいずれも、基本的には time of flight で距離 分解能を得ているが、ビームを少し離れた位置で撮 像して画像から距離情報を得るバイスタティック・ イメージングライダーもある⁷⁾.また、イメージン グライダーの一種で、ビーム上のどの距離からの散 乱も撮像面で焦点を結ぶように撮像素子を傾けた Scheimpflug ライダーも開発されている⁸⁾. Scheimpflug ライダーは通常のイメージングライダーに比べ ると背景光の影響を受けにくい、一般にメージング ライダーは、近距離まで測定できる利点があるが、 遠距離で距離の二乗に比例して距離分解能が悪くな る欠点がある.

次節ではオーソドックスな大気エアロゾル計測用 ライダーの例として,国立環境研究所で開発した ミー散乱ライダーシステムの詳細を紹介する.ま た,装置の校正や測定例について述べる.

3. ミー散乱ライダーシステムの実例

3.1 黄砂と越境大気汚染エアロゾルの常時監視 のためのライダーシステム

本節では、国立環境研究所を中心に東アジアに展 開しているライダーネットワーク(AD-Net)で用



エアロゾル計測用ライダーシステム (杉本 伸夫)



Fig. 1 Block diagram of the AD-Net two-wavelength (1064 nm, 532 nm) and polarization (532 nm) lidar.

いているライダーシステムを紹介する. AD-Net は 黄砂と越境大気汚染エアロゾルの常時観測を主目的 とするライダーネットワークで、現在、東アジアの 約 20 地点で連続観測を行なっている⁹⁾. ライダーの ブロック図を Fig.1 に示す. 遠隔地で長期間自動連 続観測するために,可能な限り簡単な構成としてい る(開発の経緯については文献10を参照された い). 測定するパラメータは、1064 nm と 532 nm の 2波長の後方散乱係数と 532 nm の偏光解消度であ る. これは NASA の衛星搭載ライダー CALIOP/ CALIPSO の測定パラメータと同じでもある.2波 長の後方散乱信号を用いて雲とエアロゾルを判別し たり, 偏光解消度を用いて黄砂と大気汚染性エアロ ゾルを分離して濃度分布を推定することができる. ライダー装置は天井に観測用のガラス窓を設置した コンテナに搭載し、雨天でも観測を止めないことと した. 測定データは、インターネット(当初は地点 によっては電話回線) で国立環境研究所に転送して 一括してデータ処理を行っている.

送受信系の配置図を Fig. 2 に示す.送信部は第二 高調波発生器付の小型のフラッシュランプ励起Q スイッチ YAG レーザー(Quantel Big Sky, ultra-CFR),ビームエキスパンダ,送信ミラーで構成さ れる.レーザーからは 532 nm と 1064 nm が同時に ひとつのビームで出力される.レーザー出力は 30 mJ (532 nm), 20 mJ (1064 nm),繰り返しは 10 Hz,パルス幅は約 10 ns である.レーザー光は,2 波長用の5倍のビームエキスパンダで口径を広げ, ビーム広がり角を1 mrad 以下に抑えた後,送信ミ ラーで鉛直上方に送信される.送信ミラーの漏れ光 を利用して,受信信号記録のトリガパルスを取って いる.受信望遠鏡には口径 20 cm のシュミットカセ グレン型を用いている.送受信の配置は biaxial 方



Fig. 2 Layout of the transmitter/receiver of the AD-Net lidar.

式である. 受信望遠鏡の無限遠光に対する焦点面に ピンホールを用いて受信視野角を1mradに抑えた 後、コリメータレンズでほぼ平行にし、ダイクロ イックミラーで 1064 nm と 532 nm を分ける. 1064 nm は APD (Licel 社のモジュール)を用いて検知 する。532 nm は偏光プリズムを用いて平行成分と 垂直成分を分けてそれぞれ PMT モジュール(浜松 ホトニクス) で検知する. APD および PMT の前に はそれぞれ. 背景光を抑えるための干渉フィルター と光電面に集光するためのレンズを取り付けてあ る. このため受信系全体を暗箱に入れる必要がな い. 2つの PMT は光軸の回りに回転可能なマウン トに偏光プリズムと一体で取り付けられ、偏光方向 の微調整や偏光測定の校正(45度に回して2つの チャンネルの入射光量を同じにして校正データを取 得する)を容易に行うことができる.全ての光学系 は光学ブレッドボードの上にネジ止めされていて. 必要に応じて配置を変更することも可能である. レーザー出力は直線偏光. 偏光方向は上下方向であ る. ミラーで折り曲げる際は反射面が偏光方向に垂 直あるいは平行になるように配置している. (そう でない場合、反射によって一般には楕円偏光にな る.) 望遠鏡に対する送信ビームの位置も偏光方向 に直交するように配置した. 受信光学系の設計は. 主望遠鏡のピンホールを通った光は全て検出器に入 るように、但し、ピンホール面の像を検出面に作ら ないように設計されている. (検出面に像を作ると、 ライダー信号が、検出面で感度が一様でないことに よる影響を受けるおそれがある.)また、言うまで もなく干渉フィルターはできるだけ平行光で使う, 偏光プリズムは透過の方が偏光度が高いので垂直偏 光チャンネルに使うなどの配慮がされている.

APD, PMT からの信号はトランジェントレコー ダで記録する. 現在 AD-Net の多くの地点で, 16 bit 分解能, 25 MHz サンプリングのトランジェントレ コーダ (タートル工業 TUSB-0216ADMH)を用い ている. 1 レーザーショット毎に記録された信号は





Fig. 3 Photographs of the AD-Net lidar in Tsukuba. (left) Overall view, (right top) transmitter, (right bottom) receiver.

PC に転送され、指定したショット数積算した後、 ハードディスクに記録される. AD-Net の通常運用 では、15分に5分間測定を行い10分間休止する モードで運用し、5分間(3000ショット)積算した データを記録している. これは、レーザーのフラッ シュランプの交換頻度を下げるためで、黄砂や越境 大気汚染エアロゾルの時間変化は遅いので時間分解 能15分で十分であるという考察に基づいている. また、ネットワーク観測の開始当初は、PCのディ スク容量や通信速度に制約があったことも理由のひ とつである.現在は、衛星観測の検証など必要に応 じて連続に運転し、10秒毎にデータを記録してい る地点もある.また、5分間の平均だけではなく、 二乗平均も記録し、信号の分散を解析(例えば大気 境界層高度の推定、雲や雨の判別)に利用すること も試みている¹¹⁾. ハードディスクに記録したデータ は、毎時、国立環境研究所に転送している.

Fig.3 にライダー装置の写真を示す. 左図の左側 のテーブルの上の黒い箱がライダー送受信部であ る. レーザーはパイプを通して送信される. これ は、天井のガラス窓によるレーザー光の反射が受信 系に入ると悪影響があるためで、送信ビームをガラ ス窓までパイプを通すことによって、ガラス面の反 射をパイプ内に戻すようになっている. 窓ガラスは Schott 社テンパックス (BORO FLOAT 33) を用い ている. コーティングは施していない. 厚さ5 mm, 一辺 35 cm で, ガラスの周辺部には結露防止 のためのヒータを貼っている. コンテナ内の温度は 空調機で制御されている. このライダーの場合は (MPLと比べると)温度条件は厳しくない(摂氏 20~40度程度)が、空調の風がライダー装置に直 接当らないように空調機の下に翼を付けるなど経験 的な問題対策も行われている. なお, このライダー システムは柴田科学により製品化されている (SIBATA L2S-SM II 型).

Fig. 3 右上は,送信部の写真で左端がレーザー, 中央にビームエクスパンダ,右端が送信ミラーであ る.Fig. 3 右下は,受信系で左上が受信望遠鏡のコ リメータレンズ,その下に折り返しミラーが見え る.手前円筒状のものは APD モジュールである. 写真の装置の場合は窒素ラマン散乱チャンネル (607 nm)が追加されており,中央のミラーがダイ クロイックミラー,その手前がラマン散乱用の PMT である.中央右奥に見える回転式のマウント に 532 nm 用の偏光プリズムと 2 つの PMT が取り 付けられている.

3.2 測定誤差,校正等

測定誤差にはランダム誤差(統計的な誤差)とシ ステマティック誤差(系統的な誤差)がある. ライ ダー計測におけるランダム誤差には光子そのものの 統計的な誤差(ショットノイズ), 平均値が時間的 に変化しない背景光雑音、熱雑音などがある。 一 方,系統的な誤差には、レーザーショットと同期し た電気的な長周期雑音、強い信号の後ろが裾を引 く, あるいは凹む信号誘導雑音 (signal induced noise: SIN) などがある. その他, AD 変換器の量子 化誤差もある. ランダム誤差は, 信号のバラツキか ら評価できる. また、ライダー波形の積算回数を増 やすことによって低減できる. 系統的な誤差は, 積 算では低減できず,評価も難しい. 電気的な雑音に ついては、望遠鏡を覆って受信光を遮断して信号波 形を記録することによって評価することができる. 信号誘導雑音 (SIN) については評価が非常に難し い. 一般に. フォトンカウンティングよりもアナロ グ方式で SIN は大きい。検出器や動作条件に依存 し、条件を最適化することで低減できるが、程度の 差はあっても SIN は避けられないとも言える.対 流圏下部のエアロゾルの観測で SIN が問題になる ことは多くないが、エアロゾルの光学特性の解析な どでは注意する必要がある.

上方を測定するエアロゾルライダーで,エアロゾ ルの少ない対流圏上部のレイリー散乱まで測定でき ている場合は,その高度の信号を基準にして Fernald法¹²⁾によって消散係数あるいは後方散乱係 数のプロファイルを導出することができる.この場 合は,信号強度の絶対値の校正は必要ない.Fernald 法ではライダー比の仮定が入るが,ライダー比の誤 差に起因する誤差はエアロゾルが薄い場合は後方散 乱係数,濃い場合は消散係数において少ない¹³⁾(文 献 14 の Fig. 2).条件の良い場合を選んで Fernald 法で後方散乱係数のプロファイルを求め,ライダー 信号と比較することによって,ライダーの装置定数



LRSJ Laser Radar Society of Japan

(次節の(2)式) を求めることができる⁹⁾.

偏光解消度測定では、レーザーの偏光度が十分に 高いこと、偏光チャンネルの角度が正しいこと、2 つの偏光チャンネルの感度が同じであることが必要 である。前の2つは装置の製作時に調整されるが、 感度の校正は適当な頻度で行うことが必要である。 AD-Net においては、望遠鏡口径よりも大きなシー トポラライザを望遠鏡の前に45度に置いて校正 データを記録し、両チャンネルの強度が同じになる ようにデータに補正係数を掛ける方法で校正してい る.

低高度(近距離)から観測するライダーでは、幾 何学的効率因子(Y(R))の補正が必要である. Y(R)を推定するひとつの手法は、エアロゾルが大 気下層でよく混合され濃度が均一である状況の測定 データを選んで、補正後のライダー信号(後述の減 衰後方散乱係数)が高度方向に一定になるように Y(R)を求める手法である¹⁵⁾. AD-Net でも通常はこ の手法を用いている⁹⁾. この他, いくつかの地点で は、口径が小さく視野角の広い受信光学系(Y(R) がより低高度で1になる)を追加して、これと比較 することによって主望遠鏡の受信光学系のY(R)を 求める手法も用いている.Y(R)が求められれば, 信号に(1/Y(R))を掛けることで補正できるが. 低高度(近距離)で送信ビームが全く受信できない 範囲ではY(R)が0となるので補正は不可能であ る. また、信号が小さすぎて補正係数が非常に大き な値となる高度範囲もデータの信頼性が低く利用で きない. AD-Net のライダーの場合は, 高度 120 m 以下のデータは使っていない.

3.3 ミー散乱ライダーシステムのシミュレー ション

この節では AD-Net のライダーを例に, ライダー 測定のシミュレーションについて述べる. これは, ライダー装置の設計時に予想される性能を評価した り, 製作した装置の性能評価を行う上で必須であ る.

ライダーの受信信号パワー(P)は、(1)式のラ イダー方程式で表される.ライダー方程式は、レー ザーパルスが大気中を伝播して、それぞれの距離で 散乱されて受光系に戻る過程を考えることによって 求められる.(1)式のPは受信信号パワー、Rは距 離(または高度)である.Rはレーザー光の往復の 伝播時間Tとの間にR=cT/2(ここにcは光速)の 関係があるので、ライダー方程式は受信信号の時間 応答波形を表すものでもある.

$$P(R) = Y(R)\eta_0 P_0 A_r \frac{ct_p}{2} \frac{\beta(R)}{R^2} exp\left[-2\int_0^R \alpha(r)dr\right]$$
(1)

Y(R)は前節で述べた幾何学的効率因子, η_0 は送受 信光学系全体の効率, P_0 は送信レーザーパワー, A_rは受信望遠鏡の面積, t_p はレーザーのパルス幅 である. β (R)が測定対象である後方散乱係数であ る.分母の R²は散乱光が球面状に広がることによ るものである.(送信ビームはほとんど広がらない で伝播するが,散乱光は球面状に広がり,受信望遠 鏡はそのごく一部分を受信する.) expの因子は距 離 R までの往復の透過率で, α (R)は消散係数であ る.なお, α , β はそれぞれ, $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, $\beta = \beta_1 + \beta_2$ のようにエアロゾルに対するもの(添字1)と大気 構成分子に対するもの(添字2)の和として表され る.ライダー方程式を簡略に(2)式のように書くと きの定数 C を装置定数と呼ぶ.

$$P(R) = C \frac{\beta(R)}{R^2} exp\left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr\right]$$
(2)

受信信号を距離(高度)毎の(時間分解能 ΔT の)光電子数Nで表すと以下のようになる.

$$N = M \frac{\eta P(R) \Delta T}{h \nu} \tag{3}$$

ここに, ηは検出器の量子効率である.また, ライ ダー信号を M ショット積算することを想定してい る.

測定されるライダー信号の信号対雑音比は次式で 表される.ここでは信号のショットノイズと背景光 雑音のみを考えている.Nsig, Nbg はそれぞれに相 当する光電子数である.

$$SNR = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bg}}} \tag{4}$$

以上に基づいて, AD-Net ライダーの受信信号と SN 比のシミュレーションを行った結果を以下に示 す.レーザー出力は, 532 nm で 30 mJ, 1064 nm で 20 mJ, 繰り返し数 10 Hz, パルス幅 10 ns, 望遠鏡 の口径 20 cm, 受信視野角 1 mrad, 検出器の量子効 率 5%,システム全体の光学的効率 30% とした.測 定では, 3000 ショット (5 分間)積算する場合を考 え,距離分解能は 30 m (時間分解能 200 ns) とし た.なお,ここでは Y(R) = 1 とした.

大気モデルは、大気構成分子については標準大 気、エアロゾルについては、高度2km以下に一様 に分布するとした.エアロゾルの後方散乱波長比 (β1064 nm/β532 nm)は0.5、濃度は、532 nmにお





Fig. 4 Simulation of the AD-Net lidar measurement. (a) atmospheric model assumed in the simulation, (b) receiver signal photoelectron number, (b) signal-to-noise ratio.

いてミー/レイリー後方散乱比が2とした. ライ ダー比はいずれの波長も50 sr とした. Fig. 4(a)に 仮定した大気モデルの後方散乱係数を示す. Fig. 4(b)に受信信号光電子数, Fig. 4(c)にSN比を 示す. ここで,昼間の背景光に相当する光電子数に ついては,実測で経験的に得られた値を用いた.

このようなシミュレーションで得られる SN 比 は、理想的な場合に到達可能な最大値である.実際 の大気の測定では仮定した条件と異なる場合が多い ので、条件の近いデータを選んで比較する(あるい は測定事例と近い条件でシミュレーションを行って 比較する)ことが必要である.なお,前節で述べた ような系統的な雑音は考えられていないことにも留 意する必要がある.

3.4 観測例

AD-Netの観測例を Fig.5 に示す. これは AD-Net のデータのホームページ (https://www-lidar.nies.go.jp/ AD-Net/) で公開している標準的なデータプロダクト の1ヶ月の表示の一例である. Fig.5の上から3つ は、532 nmの減衰後方散乱係数、532 nmの体積偏 光解消度, 1064 nm の減衰後方散乱係数で, ミー散 乱ライダーの基本的な観測パラメータである. 減衰 後方散乱係数とは(1)式の $\beta(R)exp[-2\int_{0}^{R}\alpha(r)dr]$ の ことで、距離二乗補正信号 $P(R)R^2$ に比例するが、 近距離でβ(R)を与えるように装置定数が校正され ている⁹⁾.体積偏光解消度は,受信信号の垂直偏光 成分の平行偏光成分に対する比 P₁(R)/P₁(R)であ る. 体積偏光解消度にはエアロゾルのミー散乱成分 だけでなく大気構成分子のレイリー散乱成分も含ま れている. ミー散乱成分のみの偏光解消度は粒子偏 光解消度と呼ばれる.

Fig.5の下の2つは解析データで、非球形粒子 (黄砂)と球形粒子(主に大気汚染性のエアロゾル)



Fig. 5 Example of AD-Net data (Osaka, May 2017). From top, the attenuated backscattering coefficient at 532 nm, the volume depolarization ratio at 532 nm, the attenuated backscattering coefficient at 1064 nm, the dust extinction coefficient at 532 nm, and the spherical aerosol extinction coefficient at 532 nm. A slightly strong dust event is seen from May 7 to 8 in the dust extinction coefficient plot.

エアロゾル計測用ライダーシステム(杉本 伸夫)

の消散係数を見積もったものである.これは、粒子 偏光解消度を用いて, 黄砂と球形粒子の混合比を求 め、Fernald 法で求めた消散係数を黄砂と球形粒子 に分割したものである^{9,16,17)}.この方法では、大気 エアロゾルは、黄砂とその他の球形粒子という2種 類の混合物であると仮定する. 黄砂は大きな粒子偏 光解消度を持つ(例えば 0.35). 球形粒子は小さな 粒子偏光解消度を持つ(例えば 0.05). 実際に観測 される粒子偏光解消度はその間の値を取るので、観 測値が表されるように2成分の混合比を求める.ま た,消散係数を求める際にはライダー比の仮定(S₁ =50 sr)も用いている.以上のような簡単な仮定に 基づいた手法であるが、黄砂とその他のエアロゾル が良く分離できることが光学パーティクルカウンタ (OPC) との比較などで確認されている. 黄砂消散 係数は、黄砂現象の解析や化学輸送モデルの検証や 同化、黄砂の健康影響の疫学研究など数多くの応用 研究に利用されている⁹⁾.一般に黄砂は1ミクロン 以上の大粒子で、大気汚染性エアロゾルは多くが1 ミクロン以下の粒子であると考えられているが, PM2.5 (直径 2.5 ミクロン以下の粒子の重量濃度) という観点では、PM2.5 にも多くの黄砂粒子が含ま れている. 地上サンプリング観測と下層のライダー データの比較から、ライダーで求められる 532 nm の黄砂消散係数は、黄砂 PM2.5(直径 2.5 ミクロン 以下の黄砂粒子の重量濃度)と良い相関を持つこと が分かっている¹⁸⁾、次節で考察するように、ミー散 乱理論の計算からも 532 nm のライダーは PM2.5 に 感度が高いことが示される.

AD-Netのデータは準リアルタイムで公開されて おり、黄砂の飛来状況の速報(ナウキャスト)に活 用されている.黄砂輸送モデルへのライダーデータ の同化については、予報の改善を目的とするものと 事後解析を目的とするものがある.これまで、後者 について研究が行われ、ライダーデータの同化に よって輸送された黄砂の再現精度が改善されるだけ でなく、黄砂発生源と発生量の推定にもデータ同化 手法が有用であることが示されている.予報のため のデータ同化では発生源に近いデータが必要であ り、現在のネットワークでは対応が難しい.発生源 付近では簡易なライダーであるシーロメータ(雲底 高度計)を黄砂観測に利用することや、さらに簡易 なライダーの開発なども検討している.

3.5 ミー散乱ライダーで測定されるエアロゾル の粒径と後方散乱・消散の関係

ミー散乱は波長と同じくらいの大きさの粒子によ る散乱であるといわれるが、例えばレーザー波長が





Fig. 6 Backscattering cross-section (solid line) and extinction cross-section (dotted line) at 532 nm (green) and 1064 nm (red) as a function of particle diameter calculated with the Mie theory.

532 nm のライダーはどの粒径に感度を持つか. 1064 nm ではどうか、本節ではそれらについて少し 詳しく考察する.まず、ここでは、測定するエアロ ゾルとして単一の球形粒子を考える. Fig.6 は波長 532 nm と 1064 nm に対する後方散乱断面積(実線) と消散断面積(点線)の粒径依存性を示す.複素屈 折率は黄砂(鉱物ダスト)に対するものを使ってい る. 単一の球形粒子の後方散乱断面積は粒径に対し て激しく振動する.振動の包絡線を見ると、532 nm の後方散乱は直径2ミクロンあたりにピークを持 ち, 1064 nm では4 ミクロンあたりにピークを持つ ことが分かる.消散断面積には後方散乱断面積のよ うな大きな振動は見られない. 単一粒子の消散断面 積は、(振動を別とすれば)粒径が波長よりも大き い領域では粒径の二乗に比例して大きくなる. ライ ダーでは、測定する散乱体積の中の粒径が異なる多 数のエアロゾル粒子の散乱を同時に観測するので. エアロゾルの粒径分布が重要である.

次にエアロゾルの粒径分布を考え、その分布にお いてどの粒径が後方散乱および消散に寄与している かを考察する. ここでは、黄砂(ダスト)を想定 し、体積粒径分布が、モード半径2ミクロン、標準 偏差 2.2 の lognormal 分布(例えば文献 19)の(6) 式)の場合を考える.(実際にはダストは非球形で あるため楕円体モデルが使われることが多いが、こ こではミー散乱理論で取り扱える球形粒子を考え る.) Fig.7は, 想定した粒径分布を体積粒径分布 と数粒径分布で表したもの(相対単位、横軸はリニ アスケールであることに注意)と、数粒径分布を各 粒径の後方散乱断面積、消散断面積と掛け合わせ た、粒径ごとの後方散乱および消散への寄与を表す 曲線(相対単位)をFig.6に書き加えたものであ る. ダストを想定した粒径分布であっても数粒径分 布は小粒子で非常に大きく、0.3 ミクロン付近に ピークを持つ. 粒径ごとの後方散乱および消散への





Fig. 7 Assumed particle size distribution (blue) (in relative units) and contribution of each particle size to backscattering (solid line) and extinction (dotted line) (in relative units) at 532 nm (green) and 1064 nm (orange).

寄与を見ると、532 nm では後方散乱,消散ともに 2.5 ミクロン以下の粒子の寄与がほとんどである. また,消散の方が後方散乱よりも小粒子の寄与が大 きい.前節で黄砂消散係数と PM2.5 の相関が良い ことを述べたが,これを裏付けるものである.(実 際には黄砂は非球形ではあるが,非球形の効果は主 に後方散乱に現れ,下に述べるように S₁ に影響す る.)1064 nm では,後方散乱への寄与の半分くら いが 2.5 ミクロン以上の粒子であることが分かる.

もしFig.7において、粒径分布を持つダストモデ ルに対してではなくて粒径毎に後方散乱・消散係数 の波長比やライダー比を考察すると、これらのパラ メータは粒径に依存して大きく変化することが分か る.(なお、ライダー比は、4π×(消散断面積/後方 散乱断面積)で求められる.)また、後方散乱と消 散では波長比が異なることも分かる.これらのこと から、粒径分布を仮定したモデルを考える場合も、 モード径や標準偏差(分布の幅)が変わると、ライ ダー比や、後方散乱波長比、消散係数波長比が変化 することが理解できる.

想定した lognormal の粒径分布を持つダストの後 方散乱係数,消散係数は Fig. 7 の粒径毎の寄与を粒 径で積分することによって求められ,さらに,後方 散乱波長比や消散係数波長比(あるいはオングスト ローム指数*),各波長の消散係数対後方散乱比 (ライダー比,S₁)がそれぞれ計算される.この例 では,後方散乱波長比(β 1064 nm/ β 532 nm)は 0.97,後方散乱オングストローム指数で表すと 0.045,消散係数波長比(α 1064 nm/ α 532 nm)は 1.08,消散オングストローム指数は-0.11,ライ ダー比は、532 nmで18.5 sr,1064 nmで20.6 srと なる.ここでは非球形性が考慮されていないため, ライダー比は小さな値となっているが,実際の黄砂 のライダー比は両波長ともに 50 sr 程度である.(* オングストローム指数は, α , β の波長依存性を



Fig. 8 Dependence of the lidar ratio on particle radius.

 λ^{-A} と表すときのAのことである. 原典は大気混濁 度に関する Anders Knutsson Ångströmの 1961 年の Tellus の論文. なお, Anders Knutsson Ångström は, 長さの単位で知られる Anders Jonas Ångströmの孫 である.)

Fig. 6, 7において, 消散断面積と後方散乱断面 積を比べると、消散断面積の方が小粒径まで大きい ので、ライダー比(S1)は小粒径側で大きくなるよ うに思われる.これを確認するために Fig.8 に,も う少し広い粒径範囲で粒径毎にS1を計算した例を 示す. この図は横軸が半径で log スケールになって いる.(なお、大気放射のコミュニティーでは粒径 といえば半径を意味することが多いので注意.一般 には粒径は篩(ふるい, sieve)の目の大きさに由来 しているので直径である.) 球形粒子で複素屈折率 はFig. 6,7とほぼ同じである.1064 nmのS₁は 532 nm のものを横軸を 2 倍だけシフトしたものと ほぼ重なる.小粒径側ではライダー比は大きい値に なっている. 大粒子側でもライダー比は大きいが, 横軸をシフトしても 532 nm の S₁の方が大粒子側 (半径1ミクロン以上)で大きいのは複素屈折率の 虚数部が 532 nm の方が大きい(つまり吸収が大き い)ためである.

ところで、粒径が小さくなると、レイリー散乱に 近くなるので、レイリー散乱のライダー比(S₂)の 理論的な値、S₂=8 π /3 sr=8.38 sr に近づくはずであ るが、Fig. 8 では小粒子で非常に大きい.これは複 素屈折率の虚数部が0 でないためである.実際、虚 数部を0にしてみると、半径0.01 ミクロンで、532 nm で S₁=8.43 sr、1064 nm で S₁=8.39 sr と なる. なお、虚数部が0の場合の消散係数、後方散乱係数 を 532 nm と 1064 nm で比べてみると 532 nm で 16 倍大きく、波長の4 乗に逆比例していてレイリー散 エアロゾル計測用ライダーシステム(杉本 伸夫)



乱に近いことが分かる.

複素屈折率の虚数部が0でない場合(すなわち吸 収がある場合), Fig.8に見られるように小粒子側 でも大粒子側でもS₁が大きくなることは興味深い. 消散断面積,後方散乱断面積の粒径依存性を見る と,S₁の増加は小粒子側では吸収によって消散が 大きくなるためで,大粒子側では吸収によって後方 散乱が小さくなるためである.

本節の最初の問いに対する答えをまとめるとおよ そ以下のように言える.まず,後方散乱は直径が波 長以下の粒子にはほとんど感度がない.感度が高い のは直径が波長から波長の5倍程度の粒子である (屈折率にも依存する).消散係数はもう少し小さい 粒子にも大きい粒子にも感度がある.消散係数と後 方散乱係数で粒径に対する感度が異なるので,同じ 組成のエアロゾルであっても粒径分布によってライ ダー比は異なる.

4. ラマン散乱ライダー,高スペクトル分解 ライダー

エアロゾルの光学特性やエアロゾル種の推定のた めには多波長で後方散乱係数、消散係数、偏光解消 度を測定することが必要である. 消散係数を後方散 乱係数と独立に測定する手法にはラマン散乱ライ ダーと高スペクトル分解ライダー (HSRL) があ る.いずれも大気構成分子の散乱プロファイルを利 用してエアロゾルによる減衰成分(消散係数)を測 定する. (大気構成分子の鉛直分布は既知と考えれ ば、散乱プロファイルの減衰成分のうち大気構成分 子によるもの以外がエアロゾルによるものである.) ラマン散乱ライダーは通常窒素分子の振動ラマン散 乱ライダー散乱, HSRL はレイリー散乱を利用す る. ラマン散乱に比べてレイリー散乱の方が散乱断 面積が数桁大きいので HSRL は感度が高く、昼夜 を問わず高感度の計測が可能である。レイリー散乱 の中心波長はミー散乱と同じで、違いは散乱スペク トルの波長幅のみである。レイリー散乱は大気分子 の運動によるドップラー幅が広いが、ミー散乱はほ とんど送信レーザーと同じスペクトル幅である. HSRL では散乱光のスペクトル幅の違いを利用して レイリー散乱とミー散乱と分離する. そのために干 渉計や分子フィルターを高分解能の分光素子として 用いる.

ラマン散乱ライダーも HSRL も,提案された当 初はエアロゾルの消散係数の測定が主目的ではな く,ラマン散乱ライダーでは水蒸気や大気汚染ガス が,HSRL では気温プロファイルの測定が主要な ターゲットであった.ラマン散乱ライダーを視程の 測定に用いる提案は古く,1976年の Hinkley 編の成 書の Melfi による章にも記載されている²⁰⁾.しかし ながら,エアロゾルの消散係数の測定手法として定 式化されたのは1990年頃になってからであった²¹⁾. 一方,HSRL は Fiocco らの1971年の論文まで遡る が²²⁾,測定システムの提案は1980年頃で,金属蒸 気フィルターを用いる方法²³⁾と干渉計を用いる方 法^{24,25)}がほぼ同時期に提案されている.Shipley et al.(1983)では,HSRL によりエアロゾルの散乱パ ラメータを求める手法が詳細に述べられている²⁶⁾. 消散係数の導出についても述べられているので提案 はラマン散乱ライダーよりも早いと言える.ヨウ素 セルを使った HSRL は1994年に Piironen らにより 報告されている²⁷⁾.

多波長ラマン散乱ライダーによりエアロゾルの微 物理パラメータ(単散乱アルベドや粒径)を推定す る手法はドイツの Leibniz Institute for Tropospheric Research (TROPOS) で開発された. TROPOS では 6波長を同時計測するラマン散乱ライダーが開発さ れ²⁸⁾. インバージョン法によりエアロゾルの単散乱 アルベドと有効半径を求める手法が開発された²⁹⁾. それまでにも、多波長ミー散乱ライダーからエアロ ゾルの粒径を推定する研究はいくつかあったが、複 数の波長で独立に測定した消散係数と後方散乱係数 を用いることで初めてエアロゾルの微物理パラメー タの導出が可能となったもので画期的であった. そ の後、測定波長はNd:YAG レーザーの基本波、第 二, 第三高調波の3波長(1064 nm, 532 nm, 355 nm の後方散乱係数と532 nm と355 nm の消散係数) で十分であることが示された³⁰⁾.その後, 偏光解消 度も入れて、非球形粒子の微物理量の推定ができる ようにインバージョン法が拡張された³¹⁾.多波長ラ マン散乱ライダーは欧州の多数の研究グループで開 発され、欧州のライダーネットワーク EARLINET で用いられている. なかでも、TROPOS で開発さ れた POLLY は最も完成度の高い多波長ラマン散乱 ライダー装置のひとつである^{32,33)}. 国立環境研にお いても、AD-Net ライダーの設計を拡張して多波長 ラマン散乱ライダーを開発し、現在3地点において 連続観測を行っている^{9,34)}.

HSRLの開発ではいくつかの異なるアプローチが 取られている.ひとつは,NASAの航空機搭載多波 長 HSRL である.1号機,2号機があるが,いずれ も、532 nm ではヨウ素セル、355 nm ではマイケル ソン干渉計を用いた HSRL,1064 nm ではミー散乱 ライダーで、3 波長とも偏光解消度の測定も行って いる³⁵⁾.地上のフィールド観測用のHSRLとして は、ウィスコンシン大学で開発された HSRL があ

解*説

る. これはマイクロパルス方式の HSRL で, 同一 の望遠鏡を用いて送受信が行われる³⁶⁾.既に, 極域 における長期間の観測など多くの実績がある. その 一方で, 多波長化を目指してはいないように思われ る.

国立環境研究所においても古くから HSRL の開 発を行ってきた.エアロゾルに関しては、ヨウ素セ ルを用いた 532 nm の HSRL を開発し³⁷⁾, その後, 532 nm ではヨウ素セル, 355 nm では干渉計を用い たシステムを開発した³⁸⁾.現在は、遠隔地において 長期間運用可能な HSRL の開発を目指して、2 波長 とも干渉計を用いたシンプルな構成の HSRL の開 発を進めている^{39,40)}. ねらいは、ラマン散乱ではむ ずかしい昼間も夜間と同様の感度で連続して観測を 行うことにある. このシステムの特徴は、1フリン ジ分, 周期的にスキャンする干渉計を用いることに ある. また、このときレーザー送信光の一部を参照 光として同じ干渉計に入射してライダー信号と同時 に記録する. これによって、レーザーは単一縦モー ドを維持するだけでよく、波長の制御を行う必要が ない.

Fig.9に一波長の場合の測定の概念を示す. Fig.9 中の右上の図中の点線が大気の散乱のスペクトルを 示す. 中央の鋭いピークがミー散乱である. レイ リー散乱は、ほぼガウス関数で表され半値全幅は 532 nm の場合およそ 2.5 GHz くらい(波数で表せ ば約 0.083 cm⁻¹, 波長では約 2.4 pm) である. ミー 散乱のスペクトルはレーザーのスペクトルとほぼ同 じである. その下段の図は干渉計の透過率を表し, スキャンによって透過率のピークが移動する. 上段 の図の実線(ハッチした部分)のスペクトルは、干 渉計の透過率のピークがレーザー波長に等しいとき の信号光のスペクトルである. Fig.9の左下にライ ダー受信信号を概念的に示す。 干渉計の透過率の ピークがレーザー波長に等しいときにミー散乱成分 が大きく、干渉計の透過率のミニマムがレーザー波 長に等しいときにはレイリー散乱成分がほとんどで ある.これらのライダー信号から、ミー散乱とレイ リー散乱のプロファイルが導出される. レーザーの スペクトルおよび干渉計の特性に起因するクロス トークがあるが、参照信号(ライダー信号の最初の 部分)を用いることによって評価し取り除くことが できる. 原理的には、レーザーあるいは干渉計を制 御してミー散乱信号の最大と最小に対応する信号を 記録する方法が効率は良いが、レーザーおよび干渉 計の制御が必要である。干渉計を1フリンジ分掃引 しながら参照信号とライダー信号を同時に記録する 手法では、データ解析時に参照信号からミー散乱の



Fig. 9 Concept of HSRL using a periodically scanning interferometer in the receiver.

最大,最小に対応する信号を求めて解析することが できる.このためレーザー波長の制御は必要なく, 仮にレーザーの波長や干渉計の特性が変化しても, 変化がスキャン速度に比べて十分に遅い限りは解析 が可能である.この手法はひとつの干渉計を用いた 2 波長の測定にも拡張できる.これまでに,355 nm,532 nmの HSRL 測定を同時に行えることが実 証されている.この場合は532 nmで1フリンジ, 355 nmで1.5 フリンジに相当する分をスキャンし ている.

また, さらに簡易な HSRL を目指して, マルチ モードレーザーを用いた HSRL の開発も行ってい る. この場合はレーザーの制御は必要なくなる. 既 に市販のマルチモード Nd:YAG レーザーの第2高調 波を用いてシステムを試作し測定に成功した^{41,42)}. ただし, 市販のレーザーでは縦モード間隔が狭く, 受信系に非常に長い干渉計を用いる必要があるため 受信システムの効率に限界がある. そこで, レー ザーの開発も含て計測システムを最適化するための 研究を計画している.

国立環境研究所においては、多波長ラマン散乱ラ イダーおよび多波長 HSRL のデータを用いて、エ アロゾル種を分離して、それぞれの濃度分布を推定 する解析手法の開発を進めてきた^{34, 43, 44)}. この手法 では、エアロゾル種毎の光学特性のモデルを仮定 し、観測されるエアロゾルはこれらが混合(外部混 合)しているものと考える. 多波長ライダーで観測 されたパラメータ(後方散乱係数,消散係数,偏光 解消度)が最もよく再現されるように、混合比と濃 度を決定する. 推定できるエアロゾル種は、測定さ れるパラメータに依存するが、2.1 章で触れたよう に光学的に分離できる4種類(光吸収のない微小粒 子,光吸収のない粗大粒子,光吸収のある微小粒 子,非球形粒子)である. この手法は、エアロゾル の光学特性のモデルの仮定に基づくものではある が、汎用性が高く、異なる測定パラメータを持つラ イダーによる観測の整合性の確保などにおいても有 用であると考えている⁴⁵⁾.

5. おわりに

以上, 大気エアロゾル計測用ライダーについて解 説した. 大気観測分野のハイエンドからは、遠隔地 でメンテナンスフリーで長期間連続運用可能な高感 度のマルチパラメータライダーが望まれている. 技 術的な方向はやはり HSRL である. 国立環境研究 所でも、このような方向を目指して HSRL の開発 を進めている. HSRL の原理は 1971 年の Fiocco ら の実験にまで遡るもので、基本に立ち返って考える ことの面白さを感じさせるものでもある. 新たな発 見は難しいにせよ、工夫のしどころはまだまだある のではないかと期待している.一方,簡易な弾性後 方散乱ライダーも,例えば黄砂発生域の大気下層の モニタリングなどにおいてニーズが大きい. この場 合には低価格化が課題で、違った意味での工夫が必 要である.また,簡易なライダーについては、本文 では触れなかった様々な応用分野でもニーズがある ものと期待される.本文が何らかの役に立てば幸い である.

謝 辞

西澤智明さんにはミー散乱の計算等で,神 慶孝 さんにはライダー信号のシミュレーション等で多大 な協力をいただいた.

参考文献

- N. Sugimoto, Z. Huang, T. Nishizawa, I. Matsui, and B. Tatarov: "Fluorescence from atmospheric aerosols observed with a multi-channel lidar spectrometer", Optics Express 20 (19) (2012) 20800–20807.
- J. D. Spinhirne: "Micro Pulse Lidar", IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 31 (1) (1993) 48–55.
- 3) 杉本伸夫,松井一郎,笹野泰弘:「低層大気構造観測用 ライダーにおける幾何光学的効率と送受信光学系の設 計」,光学19 (1990) 687-693.
- 4) 杉本伸夫:「偏光ライダーネットワークによる黄砂と大気汚染エアロゾルのモニタリング」. レーザー研究 39 (8) (2011) 579-584.
- N. Takeuchi, N. Sugimoto, H. Baba, K. Sakurai: "Random modulation CW lidar", Appl. Opt. 22 (1983) 1382–1386.
- 6) 湊 淳:「カオス変調を用いたレーザ遠隔計測手法の提案」, 計測自動制御学会論文集 34 (10) (1998) 1316-1320.
- K. Meki, K. Yamaguchi, X. Li, Y. Saito, T. D. Kawahara, and A. Nomura: "Range-resolved bistatic imaging lidar for the measurement of the lower atmosphere", Optics Letters 21 (17), (1996) 1318–1320.



- L. Mei and M. Brydegaard: "Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system", Optics Express 23 (24) (2015) 1613–1628.
- A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Jin, S.-W. Kim, Z. Wang, D. Batdorj, and N. Sugimoto: "Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia", Optical Engineering 56 (3) (2017) 031219.
- 10) 杉本伸夫:「ライダーによる東アジア大気環境および気候研究の推進―2017年度堀内賞受賞記念講演―」,天気 65 (5) (2018) 311-320.
- 11) 清水 厚, 杉本伸夫, 西澤智明, 神 慶孝:「AD-Net にお ける 300 秒分散データの活用」, 第 37 回レーザセンシン グシンポジウム (2019) A6.
- F. G. Fernald: "Analysis of atmospheric lidar observation: some comments", Appl. Opt. 23 (1984) 652.
- 13) Y. Sasano and H. Nakane: "Significance of the extinction/ backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation", Appl. Opt. 23 (1984) 11–13.
- 14) Y. Jin, K. Kai, K. Kawai, N. Sugimoto, T. Nishizawa, I. Matsui, A. Shimizu, and D. Batdorj: "Use of ceilometers for aerosol profile measurements: a comment from AD-Net", Proc. of SPIE 9262 (2014) 92620M.
- Y. Sasano, H. Shimizu, N. Takeuchi, and M. Okuda: "Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination", Appl. Opt. 18 (1979) 3908–3910.
- 16) N. Sugimoto, I. Uno, M. Nishikawa, A. Shimizu, I. Matsui, X. Dong, Y. Chen, and H. Quan: "Record Heavy Asian Dust in Beijing in 2002: Observations and Model Analysis of Recent Events", Geophys. Res. Lett. **30** (12) (2003) 1640.
- 17) A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, and A. Yamazaki: "Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidar in China and Japan during ACE-Asia", J. Geophys. Res. **109** (2004) D19S17.
- 18) 兼保直樹、杉本伸夫、清水 厚、山本重一、河本和明: 「ライダー観測によるダストの推定と地上観測によるエアロゾル質量濃度の比較」、大気環境学会誌47(6) (2012) 285-291.
- 19) 西澤智明, 杉本伸夫, 松井一郎, 清水 厚, 岡本 創: 「EarthCARE 衛星搭載ライダーデータを用いたエアロゾル種推定アルゴリズムの開発」, 日本リモートセンシン グ学会誌 33 (5) (2013) 367-376.
- 20) S. H. Melfi: "Remote Sensing for Air Quality Management", in *Laser Monitoring of the Atmosphere*, E. D. Hinkley (ed), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1976.
- A. Ansmann, M. Riebesell, and C. Weitkamp: "Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar", Optics Letters 15 (13) (1990) 746–748.
- 22) G. Fiocco, G. Beneditti-Michelangeli, K. Maischberger, and E. Madonna: "Measurement of temperature and aerosol to molecule ratio in the troposphere by optical radar", Nature (London) Phys. Science 229 (1971) 78.
- 23) H. Shimizu, S. A. Lee, and C. Y. She: "High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters", Appl. Opt. 22 (1983) 1373–1381.
- 24) R. L. Schwiesow and L. Lading, "Temperature profiling by Rayleigh-scattering lidar", Appl. Opt. 20 (1981) 1972.
- 25) E. W. Eloranta, F. L. Roesler, and J. T. Sroga: "The High Spec-



tral Resolution Lidar", in *Technical Digest, Workshop on Optical and Laser Remote Sensing*, Monterey, Calif., Feb. 9–11, 1982, paper I3.

- 26) S. T. Shipley, D. H. Tracy, E. W. Eloranta, J. T. Trauger, J. T. Sroga, F. L. Roesler, and J. A. Weinman: "High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: theory and instrumentation", AppI. Opt. 22 (23) (1983) 3716–3724.
- 27) P. Piironen and E. W. Eloranta, "Demonstration of a high-spectral- resolution lidar based on an iodine absorption filter," Opt. Lett. 19 (3) (1994) 234–236.
- 28) D. Müller, D. Althausen, U. Wandinger, and A. Ansmann: "Multiple-wavelength aerosol lidar" in *Advances in Atmo-spheric Remote Sensing with Lidar*, A. Ansmann, R. Neuber, P. Rairoux, and U. Wandinger, eds., Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- 29) D. Müller, U. Wandinger, and A. Ansmann: "Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: theory", Appl. Opt. 38 (1999) 2346–2357.
- 30) D. Müller, U. Wandinger, D. Althausen, and M. Fiebig: "Comprehensive particle characterization from three-wavelength Raman-lidar observations: case study", Appl. Opt. 40 (2001) 4863–4869.
- 31) I. Veselovskii, O. Dubovik, A. Kolgotin, T. Lapyonok, P. Di Girolamo, D. Summa, D. N. Whiteman, M. Mishchenko, and D. Tanré: "Application of randomly oriented spheroids for retrieval of dust particle parameters from multiwavelength lidar measurements", J. Geophys. Res. **115** (2010) D21203.
- 32) D. Althausen, R. Engelmann, H. Baars, B. Heese, A. Ansmann, and D. Müller: "Portable Raman Lidar PollyXT for Automated Profiling of Aerosol Backscatter, Extinction, and Depolarization", J. Atmospheric Ocean. Technol. 26 (2009) 2366–2378.
- 33) R. Engelmann, T. Kanitz, H. Baars, B. Heese, D. Althausen, A. Skupin, U. Wandinger, M. Komppula, I. S. Stachlewska, V. Amiridis, E. Marinou, I. Mattis, H. Linne, and A. Ansmann: "The automated multiwavelength Raman polarization and water-vapor lidar PollyXT: the neXT generation", Atmos. Meas. Tech. 9 (2016) 1767–1784.
- 34) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, Y. Hara, U. Itsushi, K. Yasunaga, R. Kudo, and S.-W. Kim: "Ground-based network observation using Mie-Raman lidars and multi-wavelength Raman lidars and algorithm to retrieve distributions of aerosol components", Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 188 (2017) 79–93.
- 35) S. P. Burton, J. W. Hair, M. Kahnert, R. A. Ferrare, C. A. Hostetler, A. L. Cook, D. B. Harper, T. A. Berkoff, S. T. Seaman, J. E. Collins, M. A. Fenn, and R. R. Rogers: "Observations of the spectral dependence of linear particle depolarization ratio of aerosols using NASA Langley airborne high spectral resolution lidar", Atmos. Chem. Phys. 15 (2015) 13453–13473.
- 36) E. W. Eloranta: "High spectral resolution lidar", in *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, C. Weitkamp (Editor) (Springer Series in Optical Sciences), Springer 2005.

- 37) Z. Liu, I. Matsui, and N. Sugimoto: "High-spectral-resolution lidar using an iodine absorption filter for atmospheric measurements, Optical Engineering 38 (10) (1999) 1661–1670.
- 38) T. Nishizawa, N. Sugimoto, and I. Matsui: "Development of a dual-wavelength high-spectral-resolution lidar", Proc. of SPIE 7860 (2010) 78600D.
- 39) Y. Jin,, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, H. Okamoto, and K. Sato: "Development of a high-spectral-resolution lidar at 355 nm and 533 nm using a scanning interferometer", 29th International Laser Radar Conference, Hefei, June 2019.
- 40)神慶孝,西澤智明,石井昌憲,青木誠,岡本創,佐藤可織:「走査型干渉計を用いた二波長高スペクトル分解ライダーの開発(その2)」,第37回レーザセンシングシンポジウム(2019) C2.
- 41) Y. Jin., N. Sugimoto, P. Ristori, T. Nishizawa, L. Otero, and E. Quel: "Measurement method of high spectral resolution lidar with a multimode laser and a scanning Mach-Zehnder interferometer", Appl. Opt. 56 (21) (2017) 5990–5995.
- 42)神慶孝,杉本伸夫,西澤智明:「マルチモードレーザー と走査型干渉計を用いた高スペクトル分解ライダーの開発」,光アライアンス9 (2018) 6-9.
- 43) T. Nishizawa, N. Sugimoto, I. Matsui, A. Shimizu, B. Tatarov, and H. Okamoto: "Algorithm to retrieve aerosol optical properties from high-spectral-resolution lidar and polarization Mie-scattering lidar Measurements", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 46 (12) (2008) 4094–4103.
- 44) Y. Hara, T. Nishizawa, N. Sugimoto, K. Osada, K. Yumimoto, I. Uno, R. Kudo, and H. Ishimoto: "Retrieval of aerosol components using multi-wavelength Mie-Raman lidar and comparison with ground aerosol sampling", Remote Sensing 10 (2018) 937.
- 45) 杉本伸夫,西澤智明,清水厚,松井一郎:「エアロゾル ライダー:データ品質保証と観測の整合性の確保」,エ アロゾル研究29(3)(2014)166-173.



1978年大阪大学大学院基礎工学研究 科修士終了.1979年国立公害研究所 (現国立環境研究所)入所.1985理 学博士(東京大学理学系研究科). レーザーを用いた能動遠隔計測手法 の開発と大気の観測研究に従事.大 気汚染 NO₂の差分吸収ライダー,成 層圏オゾンライダーの開発,ADEOS

衛星搭載レトロリフレクター (RIS) を用いた地上衛星 間レーザー長光路吸収実験などを手掛けた.また,対 流圏エアロゾル観測ライダーネットワーク (AD-Net) を構築し,黄砂や越境大気汚染エアロゾルの研究を推 進した.2014年に定年退職後,2019年3月までフェ ローとして国立環境研究所に勤務.現在は,国立環境 研究所客員研究員および名古屋大学宇宙地球環境研究 所客員教授.日本気象学会,日本エアロゾル学会,日 本リモートセンシング学会会員.米国光学会,SPIE シ ニア会員.



エアロゾル計測用ライダーシステム (杉本 伸夫)

付録:エアロゾル観測用ライダー写真集

(国立環境研究所におけるエアロゾルライダー研究)



A-1 車載型スキャニングライダー(波長1064 nm)(1978-85 ごろ).(左)全景.(中央)送受信系.送信部:東芝製 Nd:YAG レーザー.繰り返し20パルス/秒.ウェッジプリズム2枚のビームアラインメント装置.受信部:口径30 cm のカセ グレン型望遠鏡(清原光学製),光電子増倍管はRCA-7102型,量子効率は0.03%(1064 nm).(右)信号処理記録系.トラ ンジェントレコーダは岩通 DM-901(8bit, 1024 セグメント,100M サンプリング/秒),コンピュータは NOVA-02.データ はオープンリールの磁気テーブに記録.



A-2 大型スキャニングライダー(波長 532 nm)(1979–2008). 東芝製.(左)全景.(中央上)送受信系.送信部:Nd:YAG レーザー.パルスエネルギー 400 mJ(532 nm),繰り返し 25 パルス/秒.受信望遠鏡は口径 1.6 m,カセグレン型.(右上) 操作卓とレーザー電源.レーザーはオシレータと 3 段のアンプ.(右下)架台制御装置,データ収集装置.トランジェントレ コーダは岩通 DM-902.(中央下)測定制御,データ収集用コンピュータ.東芝 TOSBAC 7-40.データはオープンリールの磁 気テープに記録.



A-3 自動運転ライダー(波長 694.3 nm)(1979).(左)送受信系.送信部:ルビーレーザー.パルスエネルギー 1J,繰り返し1パルス/分.受信望遠鏡は口径 30 cm,フレネルレンズを用いた屈折式.(右)レーザー電源,測定制御,データ収集処理 装置.トランジェントレコーダは川崎エレクトロニカ製.距離二乗補正後方散乱プロファイルをペンレコーダで表示するよう設計されていた.





A-4 初期のネットワークライダー. (左) 1996 年頃のつくばの連続観測ライダー. (右) 現在の AD-Net ライダーのプロトタ イプ. 2001 頃.





A-5 連続自動観測ライダーのバリエーション.(上)海洋地球研究船「みらい」搭載ライダー(1999頃–2011). 二波長(1064 nm, 532 nm) 偏光ライダー(532 nm)(下)航空機搭載ライダー(2003頃). 偏光ライダー355 nm.



A-6 多波長ラマン散乱ライダーと HSRL.(左)多波長ラマン散乱ライダー(2012–).1064 nm,532 nm,355 nm で後方 散乱,532 nm,355 nm で消散および偏光解消度を測定.写真は九州大学.(右)干渉計を使ったマルチモード HSRL の実験 システム(写真は 2016).