

## 特集 ライダー観測 I

ミー散乱ライダーネットワークによる  
東アジア域対流圏エアロゾルのモニタリング

清水 厚

国立研究開発法人国立環境研究所 (〒305-8506 つくば市小野川 16-2)

Continuous monitoring of tropospheric aerosols  
in east Asian region using Mie-scattering lidar network

Atsushi Shimizu

*National Institute for Environmental Studies,  
16-2 Onogawa, Tsukuba 305-8506*

(Received December 10, 2021; revised January 26, 2022; accepted January 31, 2022)

The Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-Net) is a lidar network for continuous observation of vertical distributions of the Asian dust and other aerosols in East Asia. AD-Net is a contributing network to the Global Atmosphere Watch (GAW) of the World Meteorological Organization, and it forms an East Asian component of the GAW Aerosol Lidar Observation Network (GALION). The semirealtime analysis routine of AD-Net is optimized for identifying aerosol layers in the troposphere and for distinguishing the Asian dust and anthropogenic particles. The dust extinction coefficient, which is derived using aerosol extinction coefficient and particulate depolarization ratio, is a unique product in AD-Net to express the density of the Asian dust (nonspherical) particles in the atmosphere. The utilizations of dust extinction coefficient are discussed, including epidemiology, chemical transport model validation and climatological change in the Asian dust over Japan.

キーワード：ミー散乱ライダー，モニタリング，ネットワーク，エアロゾル，黄砂

**Key Words:** Mie-scattering lidar, Monitoring, Network, Aerosol, Asian dust

## 1. はじめに

大気に含まれる微小な粒子状物質（以下，便宜上エアロゾルとも表記）は，人類の健康にとって重要な要素である<sup>1)</sup>．日本では昭和 47（1972）年に SPM（浮遊粒子状物質，浮遊粉塵のうち 10  $\mu\text{m}$  以下のものの質量濃度）の長期・短期基準が告示され，以来各自治体によるモニタリングが続けられてきた<sup>2)</sup>．さらに微細な粒子による健康への影響が懸念され 2009 年には PM<sub>2.5</sub> の環境基準も策定されたが，PM<sub>2.5</sub> という言葉自体が世間に広く認知されたのは 2013 年 1 月に北京の米国大使館において約 900  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  という高濃度が観測されたことによる．それからまだ 10 年も経たないが，近年の排出規制強化による中国国内および北東アジア域の大気環境改善は著しい<sup>3)</sup>．今後，脱炭素化の進展に伴い化石燃料の利用が減少すれば，燃焼由来の人為起源エアロゾルは更に減少することが見込まれる．その一方で気候変動に伴って北米や豪州でも大規模な山火事が続発したり，2021 年春には日本にもほぼ 10 年ぶりという大規模な黄砂が飛来したり<sup>4)</sup>と，自然由来のエアロゾル動態にも変動が見られる．このような状況を捉える手段の一つとして，ミー（弾性）散乱ライダーによるエアロゾル監視ネットワーク AD-Net（Asian dust and aerosol lidar observation network）が東アジア

域で運用されている (Fig. 1). この中で稼働している観測装置としてのライダーや解析手法については既に杉本<sup>5)</sup>や Shimizu et al.<sup>6)</sup>でも詳しく述べられているので、ここではそれらの背景にある考え方や AD-Net から得られた結果の他の測器による結果との対比、疫学研究における活用など、特徴的な利用法について解説する。

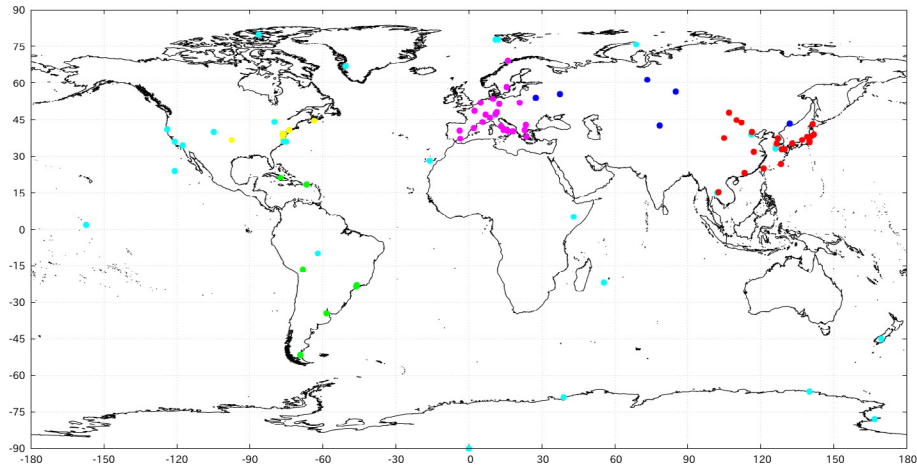


Fig. 1 Distribution of lidar observatories in GALION. Each color represents independent network, and red corresponds to AD-Net. Site information was derived from GALION implementation plan (2007).

## 2. AD-Net 展開に至る流れ

国立環境研究所におけるライダー観測には 40 年以上の長い歴史があり、手法・観測対象も多種多様に渡る。ここでは 2000 年以降の地上ライダー観測ネットワークの形成に関わる経緯を含めて述べる。つくばにおけるミー散乱ライダーの連続観測（昼夜・天候を問わず行うもの）自体は 1996 年から行われ<sup>7)</sup>、当時から Nd:YAG レーザーを 10 Hz で 5 分連続射出し 532 nm 後方散乱強度についてその平均を記録、その後 10 分休止というサイクルは維持されている。完全な連続観測でないのは、装置の熱的な負荷を減らしながらフラッシュランプの寿命を延ばすという目的があり、観測ターゲットであるエアロゾルの時間変動は雲に比べて緩やかであるため 5 分間の積算や 10 分間のギャップが許容できるという考察に基づく。つくばでの一例であるが、5 分間に 10 秒分解能で 30 回の観測を行った場合の変異係数（標準偏差/平均）はエアロゾル層では 0.02 程度であるのに対して雲底から見かけの雲頂の間では 0.3-1.0 前後であり、5 分平均値が雲の内部変動を捉えるには不十分だがエアロゾルの観測にとっては問題ないことが分かる (Fig. 2)。更に当時の通信ネットワーク環境はアナログ回線がメインで、準リアルタイムデータ処理を行うためにもデータ総量には制限があったことも確かである。その後、偏光解消度の記録も行われるなどつくばでの連続観測の実績に基づき、2001 年春の ACE-Asia キャンペーン<sup>8)</sup>に対応して北京の日中友好環境保全センターと長崎大学に同様のライダーが設置され、ほぼ同一仕様のライダーによるネットワーク観測の端緒となった。この時には東京商船大学（当時）、福山大学、京都大学信楽 MU レーダー観測所でもミー散乱ライダーによる計測が行われ<sup>9)</sup>、黄砂イベントの同時観測や化学輸送モデル CFORS<sup>10)</sup>の検証などが行われている。

その後、UNEP/ABC（国連環境計画大気褐色雲）<sup>11)</sup>の東アジア域キャンペーン EAREX2005<sup>12)</sup>や科学研究費補助金特定領域研究「東アジアにおけるエアロゾルの大気環境インパクト」<sup>13)</sup>・同新学術領域研究「東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト」<sup>14)</sup>等に参画した国立環境研究所と共同研究機関によってライダー観測地点は増加した。また環境省は主に黄砂をターゲットとして国内 5 地点でライダーの導入を行った。いずれの地点においても装置設置時の初期調整やその後のデータ転送処理・定期メンテナンスが国立環境研究所によって行われ、解析結果は 1 時間毎に統一的に AD-Net ホームページ<sup>15)</sup>から公開されている他、一般向けには環境省「黄砂飛来情報ホームページ」<sup>16)</sup>でも地上付近の黄砂消散係数を重量換算（後述）して提供している点に特色がある。また黄砂を含む越境大気汚染を対象とする以上は国外での観測も重

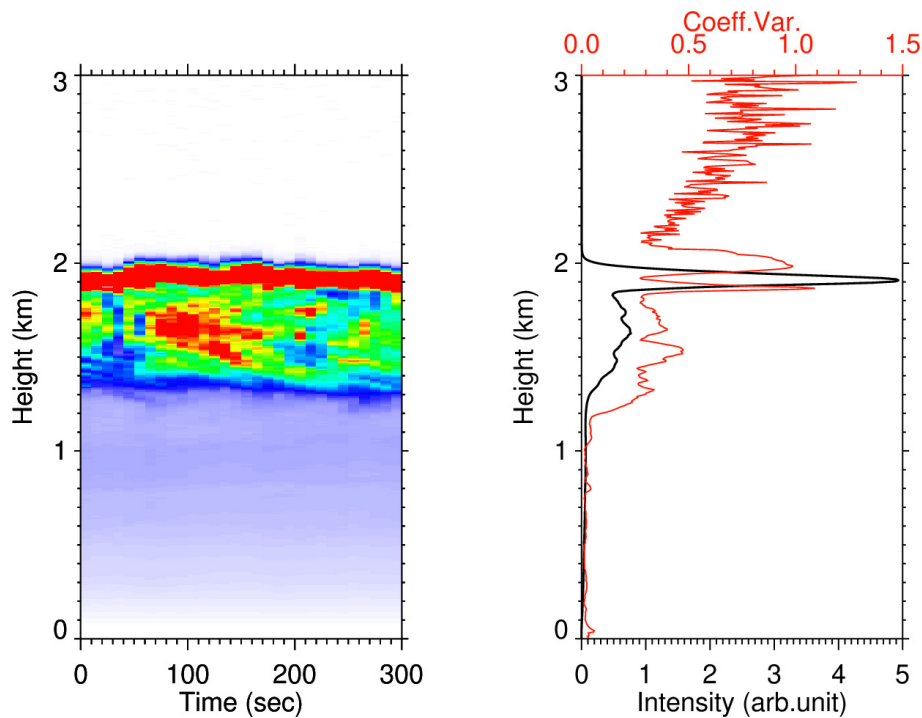


Fig. 2 (Left) Time-height distribution of backscatter intensity at 532 nm obtained during 09:45 and 09:50 UTC on 17 January 2022 at Tsukuba. (Right) Vertical profiles of averaged backscatter intensity (black, bottom axis) and coefficient of variation (red, top axis).

要であり、韓国では当初慶熙 (KyungHee) 大学、後にソウル国立大学 (Seoul National University; SNU) との連携でライダーネットワークの拡充を行った。うち1機が設置してある済州島の Gosan 観測所は上記 UNEP/ABC のスーパーサイトでもある。北京のライダーはその後中国科学院大气物理研究所 (IAP/CAS) において運用されたものの、中国での法改正によりライダーデータのリアルタイム処理/表示は行われなくなった。黄砂発生源の一つであるモンゴルでは JICA の協力の下、首都ウランバートルとゴビ砂漠内2地点に黄砂モニターや気象測器と共にライダーが設置され、現在も運用が続いている。なお AD-Net で使われているライダーとほぼ同型なのは海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の海洋地球研究船「みらい」やタイの SriSamrong (後に Phimai に移転)、パラオでも運用されてきたがこれら地点では黄砂はターゲットではないため、基本的には AD-Net と区別することが多い。また AD-Net は WMO/GAW (世界気象機関全球大気監視) に対する contributing network として位置づけられており、欧州 EARLINET や NASA による MPLNET などと形成する GALION (GAW Aerosol Lidar Observation Network) の東アジアをカバーするネットワークとしても活動している。Fig. 1 に示すように、AD-Net は欧州や米国東海岸に並び稠密なネットワークを形成しており、特に黄砂の輸送ルートを検討した地点配置となっている点に特徴がある。以上に述べた AD-Net 展開の経緯については別途杉本による日本気象学会堀内賞受賞記念講演<sup>17)</sup>でも触れられている。

### 3. データ処理方針の特徴

AD-Net におけるデータ処理の流れを Fig. 3 に示す。AD-Net ライダーの処理では、単一プロファイルのみからライダー方程式を解いてエアロゾル消散係数を得るような設計を行っていない。もともと地表面に近いエアロゾルの持続的な監視 (モニタリング) を目的として自動観測を行っているため、AD-Net では曇天時・雨天時にも観測データが取得されている。インバージョンにあたっては事前に雲・雨といったエアロゾル以外の散乱体からの信号を特定する必要がある。この時点で利用できるパラメータは後方散乱強度と体積偏光解消度のみである。ライダーの装置定数のうち、射出レーザー強度および送受信系での損失 (具体的には天窓ガラス面における汚れ付着の影響) については時間変動が考えられるため、減衰後方散乱係数はこの時点で利用できない。AD-Net では、この装置定数は一ヶ月の間には一定範囲でしか変動しないと仮定し、

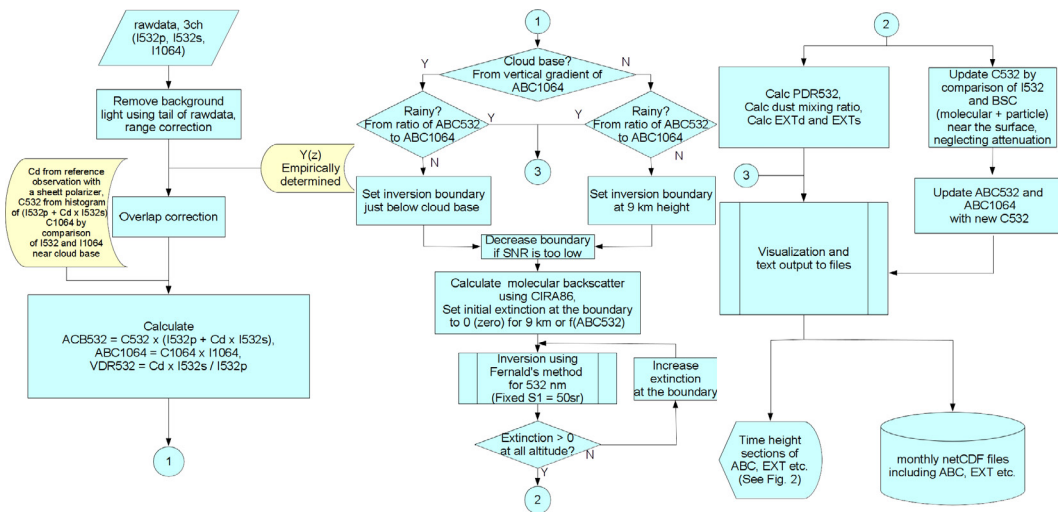


Fig. 3 Data processing sequence of AD-Net (reproduced from Figs. 4–6 of Shimizu et al.<sup>6)</sup>). I, ABC, EXT and C (followed by wavelength) stand for backscatter intensity, attenuated backscatter coefficient, extinction coefficient and system constants, respectively. Subscripts (p, s) designate parallel and perpendicular components of polarization. VDR and PDR denote depolarization ratio and particle depolarization ratio, respectively.

月間の全観測データから装置定数を推定するアプローチを取っている。具体的には、まず下部対流圏（地上付近を除く）における 532 nm 後方散乱強度の出現頻度分布を調べ、そのピークの位置から月間の推定装置定数を得る。これは東アジア域での観測ではエアロゾルによる散乱がそれほど強くない（レイリー散乱に近い）領域が大部分を占めるという経験に基づくが、殆どのデータが雨天といったような期間には信頼性がない点に留意が必要である。実例として様々な地点・季節における月間の減衰後方散乱強度の出現頻度分布を Fig. 4 に示す。この推定装置定数から導かれる 532 nm 減衰後方散乱係数の絶対値を利用して、対流圏下層における雲底高度を仮決定する。さらにその雲底高度における後方散乱強度に波長依存性が弱いことを仮定して、1064 nm と 532 nm との装置定数の比を推定し 1064 nm 減衰後方散乱係数を得る。以上の前処理を行った上で、改めて 1064 nm 減衰後方散乱係数の鉛直勾配と係数そのもののピーク値から対流圏全域で雲底を決定、また減衰後方散乱係数（あるいはその波長依存性）の分布の特徴（鉛直方向一様性や地上付近で

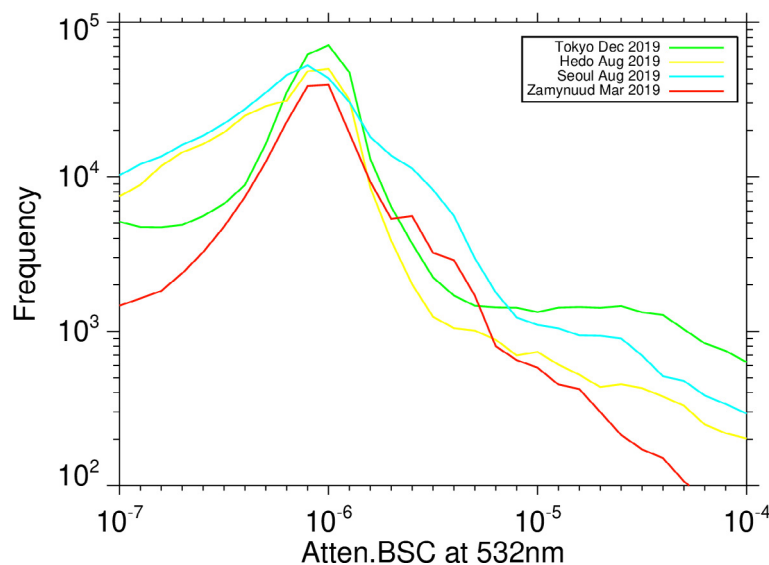


Fig. 4 Frequency distributions of attenuated backscatter coefficient at 532 nm between 1200 m and 6000 m in independent months.



の急激な減衰等)から降水(雨/雪)や霧といったエアロゾル解析に向かない時間帯を特定する。晴天時や、中部対流圏以上のみに雲がある場合は、雲底下あるいは後方散乱強度のSN比が一定以上である上限高度(最大9 km)から下向きに532 nmについて $S1=50$  srの仮定のもとFernald法<sup>18)</sup>によるインバージョンを行う。

Fig. 5に2021年3月の大阪における観測例を示す。ここで3月末の黄砂時に消散係数(下2段)の表示高度範囲が狭くなっているのは、下層の濃い黄砂層による消散が強いために上空でのSN比が低下していることと対応している。また観測上限が成層圏まで届かないことからFernald法の上限高度におけるエアロゾル消散係数の初期値はまずゼロとして計算を行い、それ以下の高度で負の消散係数が現れれば上端での値を増加させ再計算を行うというイタレーションを行っている。

こうした処理の結果得られた消散係数は更に粒子偏光解消度を用いて非球形由来(黄砂消散係数)と球形由来(球形粒子消散係数)とに分離されるが、これらの値の利用法については次節で詳説する。データ処理の最後に、減衰があまり強くない低空においてインバージョンで得られた消散係数(エアロゾルの他、分子も考慮)と後方散乱強度を統計的に比較して最終的なその月の装置定数を決定、これにより改めて減衰後方散乱係数を出力して最終的なプロダクトとしている。勿論、月の途中で装置のメンテナンスが行われ不連続に装置定数が変化する場合には、それに相当する補正値を外部から与える。この他、偏光解消度の校正や下層のオーバーラップ補正等については、Shimizu et al.<sup>6)</sup>を参照されたい。またデータの公開にあたっては、時間高度断面図の他に当初はアスキー形式で数値データをホームページ上に掲載していたものの、2012年以降は自己記述形式であるnetCDFでの提供も行っている。現在GALIONデータセンターの設立が準備されつつあり、標準的なメタデータの作成等についてワーキンググループでの議論が続けられている。

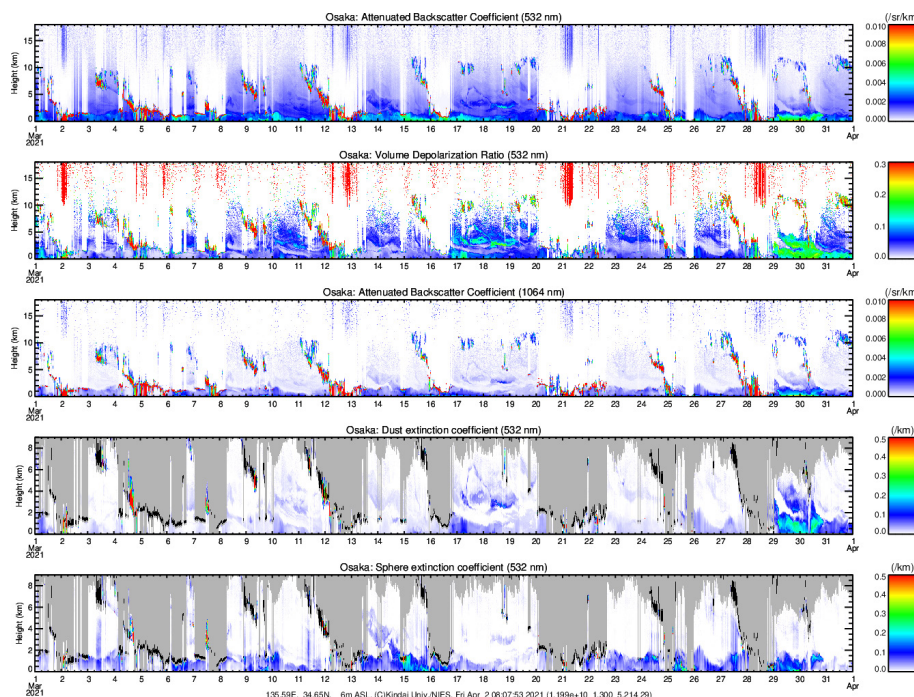


Fig. 5 Time-height sections of (from top) 532 nm attenuated backscatter coefficient, 532 nm volume depolarization ratio, 1064 nm attenuated backscatter coefficient, 532 nm dust extinction coefficient, and 532 nm spherical particle extinction coefficient measured at Osaka, Japan on March 2021. Panels of extinction coefficients include the information about cloud layers (black) and non-observable region (gray).

#### 4. 他の測定結果との比較および質量濃度換算

まず、環境モニタリングとしてライダーから得られる消散係数というものの扱いについて検討する。そもそも消散係数(視程の逆数に比例)は光学的な量であり、大気中に浮遊する粒子の環境基準として設定され

ている質量濃度とは異なる概念の測定値である。エアロゾルの環境影響を論ずるにあたっては、精度に限界があるにせよ消散係数から質量濃度への換算は避けられない問題である。その変換係数 (Mass-Extinction Conversion Factor; MECF) は浮遊する粒子の粒径分布・比重等の関数で、特に粒径分布については吸湿性粒子においては湿度の影響も受けるなど変動が大きいことが考えられる。一方で土壌性粒子、特にユーラシア内部から長距離輸送されて日本国内に到達する黄砂については吸湿性を考慮する必要がほぼなく、さらに粒径も概ね  $4\mu\text{m}$  付近をピークとすることが知られているため<sup>19)</sup>、MECF を推定することが試みられてきた。例えば Shimizu et al.<sup>20)</sup> では、国内の顕著な黄砂イベント時にフィルターサンプリングにより得られた粒子総重量 (Total suspended particles = TSP, 24 時間平均) と黄砂消散係数とを比較し、概ね  $1.0/\text{km} = 1.0\text{ mg}/\text{m}^3$  という値を得た。この結果に基づき、前述の環境省黄砂飛来情報 HP でも黄砂消散係数は質量換算された形で表示している。勿論この値は日本における黄砂に限定して有効なもので、例えば黄砂発生源付近ではより大粒子が卓越するため MECF としては同じ消散係数でも質量濃度が大きくなる側にシフトすると考えられる。実際にモンゴルのシーロメータを利用した MECF の推定が小原らによって行われている<sup>21)</sup>。

また、地上観測と AD-Net ライダーによる黄砂消散係数 (低空の値) との比較は Shimizu et al.<sup>22)</sup> や兼保ら<sup>23)</sup> によっても行われている。前者では気象台黄砂観測 (目視) と黄砂消散係数の対応を調査し、地点により傾向が異なることを示した他、Optical Particle Counter (OPC) による粒子数と 2 成分の消散係数との対応についても調べた。一方後者では、九州において長期に渡り取得されたフィルターサンプル (24 時間ごと) から得られた金属元素濃度の日変動と黄砂消散係数とが比較され、Fe や Al の濃度と黄砂消散係数とに良い相関があることが示された。黄砂消散係数の時間高度分布を複数地点に渡って並べることで、一つの黄砂イベントについて東アジア域における時空間変動を捉えた例を Fig. 6 に示す。地点毎の到着時間差や、微細な層構造がある程度距離が離れた地点同士でも見られるなど、ネットワーク観測ならではの比較が可能となっている。

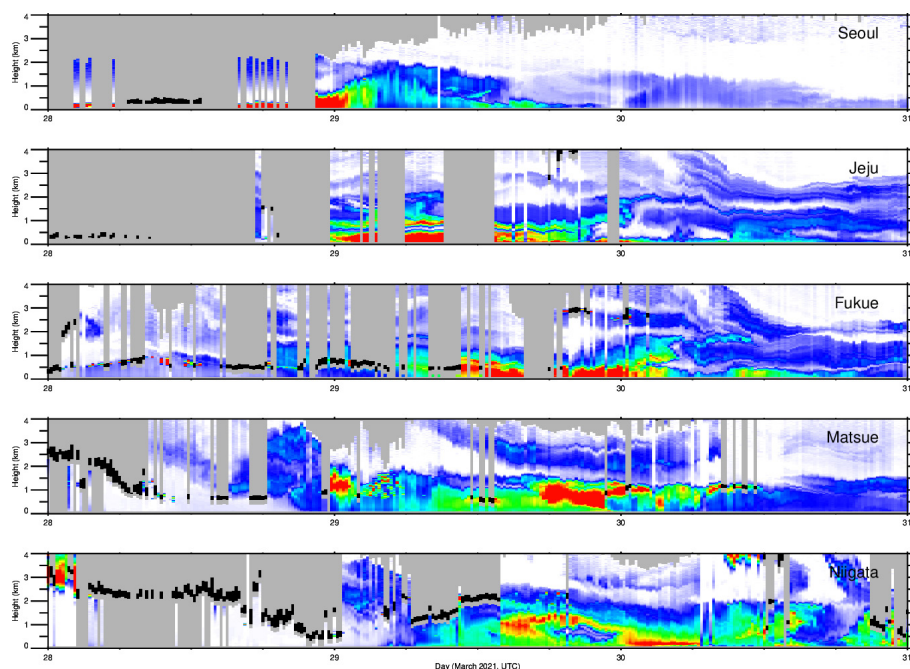


Fig. 6 Time-height sections of dust extinction coefficient at (from top) Seoul, Jeju, Fukue, Matsue and Niigata during 28 and 31 March 2022. Black and gray areas correspond to cloud layers and non-observable region, respectively.

他の光学的な測器との対比としてはスカイラジオメータによる光学的厚さ (AOD) とライダーによる後方散乱係数の鉛直積分値を比較したもの<sup>9)</sup>や Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS) による低空の消散係数と比較したもの<sup>24)</sup>などが存在するが、AD-Net では対流圏全域に渡るエアロゾル観測は行えないので全気柱 AOD との比較には限界があることにも注意が必要である。



## 5. 疫学での利用と数値モデル検証・同化、トレンド検出

大気中の微粒子の健康影響については、そもそも SPM や  $PM_{2.5}$  の環境基準自体が人体に影響を及ぼすレベルの濃度が生じないための目安として設定されたものである。基準達成率が向上した現在では粒子の化学成分毎、およびそれらを用いた Positive Matrix Factorization (PMF) 解析等に基づく推定発生源の影響について調査を行う方向へとシフトしており、環境省でも常時監視局における SPM/ $PM_{2.5}$  測定の外に成分自動測定器を順次導入してそれらの影響調査を進めている。AD-Net の場合、エアロゾルの成分として特定出来るのは黄砂（土壌性粒子）のみではあるが、 $PM_{2.5}$  が全国的に計測される以前から黄砂消散係数を提供してきたこともあり黄砂の疫学研究に幅広く使われてきた。例えば黄砂イベント（黄砂消散係数の上昇）と救急搬送件数との関連<sup>25)</sup>、アレルギーとの関連<sup>26)</sup>、喘息との関連<sup>27, 28)</sup>、胎盤早期剥離との関連<sup>29)</sup>等が調べられている。疫学研究においてライダーデータを利用する場合に注意が必要なのは、殆どのケースで日単位の値が求められるという点である。これは、疫学研究において多くの健康に関わるデータ（入院患者数や特定の症状を発症した人数）が日単位で集計されているためで、例えば黄砂の暴露を示す指標として観測データを24時間平均するとしても何時から何時までが最もふさわしいのかといった点も考慮しなくてはならない。また AD-Net の場合には、前述の通り雲や雨などの判定は一定の基準で行っているものの、完全に除外出来る訳でなく時にはエアロゾル消散係数へのコンタミネーションの形で非常に大きい値が含まれてしまうことがある。1日96プロファイルの中の一つだけがそういったコンタミネーションであってもその影響は大きく、平均値ではその影響を排除出来ない。例えば日平均黄砂消散係数を求める際には3時間（12プロファイル）でまずメディアンを求め、1日8つのメディアンについて有効データ数の重み付け平均を取るなどの工夫を行っている（データは鉛直方向にも幅がある）。あるいは、黄砂日を特定するためには黄砂消散係数の時間値と近傍の常時監視局 SPM 値との相関が高いこと、といった条件を課した例もある<sup>19)</sup>。黄砂日/非黄砂日の2値が求められる場合には黄砂消散係数に閾値を設定しなくてはならず、これも経験的に決めるしかない（たとえば0.07/km）。いずれにしてもライダーデータ利用者側のニーズと、観測側の限界（雲雨判定の不十分な点など）とを勘案してベストのデータセットを作成するのも AD-Net の運用上必要な作業である。

更に、化学輸送モデルの検証にもライダー観測結果は有効である。前述の Shimizu et al.<sup>9)</sup>では2001年5月末に到来した黄砂の日本各地におけるライダー観測結果とモデル（CFORS）計算結果を時間高度断面図として比較したが、その後更にライダーデータの定量的な利用手法として黄砂濃度のデータ同化に関する論文が出版されている<sup>30, 31)</sup>。データ同化は、数値モデルにおいて予測された各格子点上の第一推定値を時空間上に不均一に存在する観測値を利用しながら修正していき最適推定値（解析値）を求める手続きであり、気象予測においては歴史的な実績がある<sup>32)</sup>。エアロゾルのような物質輸送を対象にした場合、よく利用されているのは極軌道衛星搭載イメージャによって観測されたエアロゾル光学的厚さ（AOD）を利用した同化である。これに対してライダー観測結果は鉛直分布の情報をもち、また夜間も含め時間的に連続したデータを得られる点が強みとなる。黄砂のデータ同化においてはモデル内で得られた各ビン（粒径分布における一定のサイズ幅）毎の重量濃度から得られる消散係数に対して、ライダー観測から得られた消散係数によって同化を行う。4次元変分法やアンサンブルカルマンフィルタといった手法<sup>32)</sup>により、実際の黄砂の3次元分布に近い解析値が得られることが示された。データ同化では減衰後方散乱係数のようなモデル内変数でないパラメータも観測演算子を通じて利用することが可能である。しかし実際に AD-Net のようなライダーで観測される減衰後方散乱係数や粒子偏光解消度の分布は、黄砂以外の球形エアロゾル（硫酸塩や有機エアロゾル等）にも依存するため、それらの推定精度にも結果が影響される可能性がある。CALIOP のような人工衛星搭載ライダーであれば視線方向の手前側（上空）に黄砂層が見られるケースもあり、そのような場合は球形エアロゾルの影響を殆ど受けずに黄砂のデータ同化が可能となる場合も考えられる。地上からのライダー観測では上記のように黄砂消散係数を利用する方法が（分離アルゴリズムを受け入れる限り）有利になる。

なお球形粒子消散係数についてもモデルとの比較は行われており<sup>33)</sup>、輸送モデル内でのエアロゾル鉛直分布の検証に利用されている。エアロゾルを長距離輸送する偏西風の強さは高度方向に変化しているため、発生源付近のエアロゾルがどの高度に到達しているかは最終的にその空気塊が水平方向にどこまで輸送されるかに関わっている。こういった観点からも、ライダーネットワークによるエアロゾル鉛直分布観測がモデ

ルの検証や改良に有効なデータであることが伺える。

この他、長期観測であることを活かしてエアロゾルの中長期的なトレンドを AD-Net から検出することも黄砂<sup>34)</sup>・球形粒子<sup>35,36)</sup>の両者について行われている。モニタリング測器である以上、突発的事象の検出と並んでトレンド検出は重要な役割であり、今後は更にこのような活用が広がることが望ましい。

## 6. 今後の展望

AD-Net におけるシンプルなミー散乱（弾性散乱）ライダーの活用は特に黄砂研究において幅広く応用されてきた。一方で人為汚染粒子（球形粒子）についてはその化学組成毎に発生源・前駆物質や大気中での化学反応が異なっているが、AD-Net の標準解析では化学組成についての情報は得られない。これに対して国立環境研究所の西澤・神らによる多波長ラマン散乱ライダーや高スペクトル分解ライダーは球形粒子の化学組成の推定に繋がる情報も得ることが出来、実際に福岡におけるライダー観測結果を地上の自動測定器による黒色炭素濃度と比較した結果が Hara et al.<sup>37)</sup>で示されている。このような高性能ライダーは得られる情報量が多い反面、現行の AD-Net のような連続自動観測を行うには困難が伴う。このため、将来的には観測ネットワーク上で特に重要な地点を特定して高性能なライダーに置き換えていくことが望まれ、その地点の選定においては前述のデータ同化に与えるインパクトを参照することが一つの選択である。また、これら高性能ライダーでは現行 AD-Net ライダーではカバーしきれない上部対流圏でも十分な SN 比が確保されるため、中東・アフリカ等から輸送されてくるダスト<sup>38)</sup>や氷晶核を対象とした研究等にも強みを発揮することが期待される。一方、たとえばゴビ砂漠のように高濃度のエアロゾルが存在する場合はほぼ黄砂と考えて差し支えない地点では、得られる情報が少なくても維持管理が容易なシーロメータの活用も考えられる。これまでも名古屋大学のグループがシーロメータによる黄砂観測で成果を挙げてきた<sup>39,40)</sup>他、最近では偏光解消度が取得できるシーロメータも発売されるなど<sup>41)</sup>、ライダーに近い情報も得られるようになっている。また各空港には雲底高度を計測する目的でシーロメータが配備されているため、それらからエアロゾル分布に関する情報が得られれば既存のライダーネットワークの空間カバー率の低さが大幅に改善される可能性がある。筆者は個人的に気象庁関係者に航空気象台のシーロメータデータにアクセスできないか何度か問い合わせてきたが明確な反応を得られたことはない。もし今後国内外の空港設置シーロメータのデータにアクセス出来るようになれば、東アジア領域でのエアロゾル3次元構造がさらに詳しく明らかにされる可能性があり、オープンデータサイエンスの方向性にも合致するものとなる。また火山噴火による影響は航空業界で非常に大きく、空港配備シーロメータから火山灰の濃度分布が把握出来れば航空機エンジンへのダメージの見積もり等が迅速に行われ、航空輸送に対する噴火の影響を最小限に抑えることが期待される。

このように、対流圏エアロゾルの継続的な監視をライダーで行うという目標が変わりはないとしても測定装置（および解析サーバー処理能力）の進歩に伴いネットワークの運用方針、具体的にはどのようなユーザーにどういった質のデータを提供していくべきなのかについても変化していく必要がある。またその方向性を検討するにあたっては、行政や一般社会でのニーズ（少なくとも研究ソサエティにおける要望）を取り込んでいくことも重要であるというのが AD-Net の運用、特にデータ提供部分に携わってきた者としての認識である。

## 謝 辞

AD-Net は環境省委託事業および環境再生保全機構の環境研究総合推進費 5-2001（JPMEERF20205001）の支援を受け運用しています。各ライダー観測地点で支援下さっている皆様はこの場をお借りして御礼申し上げます。

## 引用文献

- 1) IARC, Air Pollution and Cancer, World Health Organization (2013).
- 2) 環境省, “大気汚染物質広域監視システム（そらまめくん）”, <https://soramame.env.go.jp/>, (Accessed 2021.12.10).
- 3) I. Uno, Z. Wang, S. Itahashi, K. Yumimoto, Y. Yamamura, A. Yoshino, A. Takami, M. Hayasaki, B.-G. Kim, “Paradigm shift in aerosol chemical composition over regions downwind of China”, *Scientific Reports*, **10**, 1, 6450 (2020).
- 4) 河野麻由可, “今月のひまわり画像—2021年3月”, *天気*, **68**, 5, p. 252 (2021).



- 5) 杉本伸夫, “エアロゾル計測用ライダーシステム”, レーザセンシング学会誌, **1**, 1, 14–28 (2020).
- 6) A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Jin, S.-W. Kim, Z. Wang, D. Batdorj, N. Sugimoto, “Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia”, *Opt. Eng.*, **56**, 3, 03129 (2016).
- 7) 松井一郎, 杉本伸夫, “小型ミュー散乱ライダーによる雲・エアロゾルの連続観測”, 第18回レーザセンシングシンポジウム, 171–172 (1997).
- 8) J. H. Seinfeld, G. R. Carmichael, R. Arimoto, W. C. Conant, F. J. Brechtel, T. S. Bates, T. A. Cahill, A. D. Clarke, S. J. Doherty, P. J. Flatau, B. J. Huebert, J. Kim, K. M. Markowicz, P. K. Quinn, L. M. Russell, P. B. Russell, A. Shimizu, Y. Shinozuka, C. H. Song, Y. Tang, I. Uno, A. M. Vogelmann, R. J. Weber, J.-H. Woo, X. Y. Zhang, “ACE ASIA: Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and pollution”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **85**, 3, 367–380 (2004).
- 9) A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Arao, I. Uno, T. Murayama, N. Kagawa, K. Aoki, A. Uchiyama, A. Yamazaki, “Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia”, *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S17 (2004).
- 10) I. Uno, G. R. Carmichael, D. G. Streets, Y. Tang, J. J. Yienger, S. Satake, Z. Wang, J.-H. Woo, S. Guttikunda, M. Uematsu, K. Matsumoto, H. Tanimoto, K. Yoshioka, T. Iida, “Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment”, *J. Geophys. Res.*, **108**, 8668 (2003).
- 11) V. Ramanathan, C. Chung, D. Kim, T. Bettge, L. Buja, J. T. Kiehl, W. M. Washington, Q. Fu, D. R. Sikka, M. Wild, “Atmospheric brown clouds: Impacts on south asian climate and hydrological cycle”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **102**, 15, 5326–5333 (2005).
- 12) T. Nakajima, S.-C. Yoon, V. Ramanathan, G.-Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B.-J. Sohn, S.-W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N.-H. Lin, C.-T. Lee, D. Goto, N. Schutgens, “Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia”, *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S91 (2007).
- 13) 笠原三紀夫・東野 達(編), エアロゾルの大気環境影響, 京都大学学術出版会 (2007).
- 14) 畠山史郎, “東アジアから輸送されるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト解明を目指して”, エアロゾル研究, **26**, 2, 103–107 (2011).
- 15) 国立環境研究所, “Ad-net, the asian dust and aerosol lidar observation network”, <https://www-lidar.nies.go.jp/AD-Net/>, (Accessed 2021.12.10).
- 16) 環境省, “黄砂飛来情報”, <http://www2.env.go.jp/dss/kosa/>, (Accessed 2021.12.10).
- 17) 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, 311–320 (2018).
- 18) F. G. Fernald, “Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments”, *Appl. Opt.*, **23**, 5, 652–653 (1984).
- 19) 環境省, “黄砂実態解明調査報告書”(2009).
- 20) A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, I. Mori, M. Nishikawa, M. Kido, “Relationship between lidar-derived dust extinction coefficients and mass concentrations in Japan”, *Sci. Online Lett. Atmos.*, **7A**, 1–4 (2011).
- 21) 小原一真, 牧 輝弥, 能田 淳, E. Davaanyam, 源 祐輝, 河合 慶, 甲斐憲次, “シーロメーターとダスト係留気球の同時観測から得られたゴビ砂漠におけるダストの鉛直粒径分布とMECFの算出”, 第22回大気ライダー研究会, 3–4 (2018).
- 22) A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, T. Nishizawa, “Direct comparison of extinction coefficients derived from Mie-scattering lidar and number concentrations of particles, subjective weather report in Japan”, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **153**, 77–87 (2015).
- 23) 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, 285–291 (2012).
- 24) H. Irie, Y. Kanaya, H. Akimoto, H. Iwabuchi, A. Shimizu, K. Aoki, “First retrieval of tropospheric aerosol profiles using MAX-DOAS and comparison with lidar and sky radiometer measurements”, *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2, 341–350 (2008).
- 25) K. Ueda, A. Shimizu, H. Nitta, K. Inoue, “Long-range transported Asian Dust and emergency ambulance dispatches”, *Inhal. Toxicol.*, **24**, 12, 858–867 (2012).
- 26) K. T. Kanatani, K. Hamazaki, H. Inadera, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Noma, K. Onishi, Y. Takahashi, T. Itazawa, M. Egawa, K. Sato, T. Go, I. Ito, Y. Kurozawa, I. Konishi, Y. Adachi, T. Nakayama, “Effect of desert dust exposure on allergic symptoms; A natural experiment in Japan”, *Ann. Allergy Asthma Immunol.*, **116**, 5, 425–430.e7 (2016).
- 27) T. Nakamura, M. Hashizume, K. Ueda, A. Shimizu, A. Takeuchi, T. Kubo, K. Hashimoto, H. Moriuchi, H. Odajima, T. Kitajima, K. Tashiro, K. Tomimasu, Y. Nishiwaki, “Asian dust and pediatric emergency department visits due to bronchial asthma and respiratory diseases in Nagasaki, Japan”, *Journal of Epidemiology*, **26**, 11, 593–601 (2016).
- 28) T. Nakamura, Y. Nishiwaki, K. Hashimoto, A. Takeuchi, T. Kitajima, K. Ko mori, K. Tashiro, H. Hasunuma, K. Ueda, A. Shimizu, H. Odajima, H. Moriuchi, M. Hashizume, “Association between Asian dust exposure and respiratory function in

- children with bronchial asthma in Nagasaki Prefecture, Japan”, *Environmental Health and Preventive Medicine*, **25**, 1, 8 (2020).
- 29) T. Michikawa, S. Yamazaki, A. Shimizu, H. Nitta, K. Kato, Y. Nishiwaki, S. Morokuma, “Exposure to Asian dust within a few days of delivery is associated with placental abruption in Japan: a case-crossover study”, *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*, **127**, 3, 335–342 (2020).
  - 30) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, S. Satake, “Adjoint inverse modeling of dust emission and transport over East Asia”, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08806 (2007).
  - 31) K. Yumimoto, I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu, D. M. Winker, “Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations”, *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 11, 2869–2884 (2008).
  - 32) 露木 義, 川畑拓矢(編), 気象学におけるデータ同化, 気象研究ノート 217, 日本気象学会 (2008).
  - 33) Y. Hara, I. Uno, A. Shimizu, N. Sugimoto, I. Matsui, K. Yumimoto, J. Kurokawa, T. Ohara, Z. Liu, “Seasonal characteristics of spherical aerosol distribution in eastern Asia: Integrated analysis using ground/space-based lidars and a chemical transport model”, *Sci. Online Lett. Atmos.*, **7**, 121–124 (2011).
  - 34) A. Shimizu, N. Sugimoto, T. Nishizawa, Y. Jin, D. Batdorj, “Variations of dust extinction coefficient estimated by lidar observations over Japan, 2007–2016”, *Sci. Online Lett. Atmos.*, **13**, 205–208 (2017).
  - 35) 原由香里, 鵜野伊津志, 清水 厚, 杉本伸夫, 松井一郎, 大原利真, Z. Wang, S. Yoon, “東アジアにおける人為起源エアロゾルによる光学的厚さの近年のトレンドの解析”, *天気*, **59**, 8, 702–707 (2012).
  - 36) 清水 厚, “ライダーにより検出された日本上空におけるエアロゾル鉛直分布の中長期的変動”, *エアロゾル研究*, **33**, 2, 84–88 (2018).
  - 37) Y. Hara, T. Nishizawa, N. Sugimoto, K. Osada, K. Yumimoto, I. Uno, R. Kudo, H. Ishimoto, “Retrieval of aerosol components using multi-wavelength Mie-Raman lidar and comparison with ground aerosol sampling”, *Remote Sensing*, **10**, 6 (2018).
  - 38) N. Sugimoto, Y. Jin, A. Shimizu, T. Nishizawa, K. Yumimoto, “Transport of mineral dust from Africa and middle east to east Asia observed with the lidar network (AD-Net)”, *SOLA*, **15**, 257–261 (2019).
  - 39) K. Kawai, K. Kai, Y. Jin, N. Sugimoto, D. Batdorj, “Dust Event in the Gobi Desert on 22–23 May 2015: Transport of Dust from the Atmospheric Boundary Layer to the Free Troposphere by a Cold Front”, *SOLA*, **11**, 156–159 (2015).
  - 40) K. Kawai, Y. Nishio, K. Kai, J. Noda, E. Munkhjargal, M. Shinoda, N. Sugimoto, A. Shimizu, E. Davaanyam, “Ceilometer observation of a dust event in the Gobi Desert on 29–30 April 2015: arrival of a developed dust storm and trapping of dust within an inversion layer”, *SOLA*, **15**, 52–56 (2019).
  - 41) ヴァイスラ, “CL61 ライダーシーロメータ”, <https://www.vaisala.com/ja/products/weather-environmental-sensors/ceilometer-CL61>, (Accessed 2021.12.10).



**清水 厚**

1999年3月, 京都大学大学院理学研究科にて博士(理学)取得。同年12月, (当時)環境庁国立環境研究所大気圏環境部研究員。地上/船舶・航空機搭載ミースカライダー観測に関わり, 特に地上ライダーネットワークではデータ転送から自動解析/データ公開を行うシステムの構築を担当する。現在, 国立環境研究所地域環境保全領域主幹研究員。環境省水・大気環境局黄砂問題検討会委員, 日中韓環境大臣会合(TEMM)黄砂共同研究ワーキンググループ1委員ほか。