

特集 産業応用ライダー

工場内浮遊粒子状物質の測定を目的とする 小型ミー散乱ライダーの開発

左成 信之¹, 板谷 庸平¹, 横川 守久¹,
神 慶孝^{*2}, 杉本 伸夫², 西澤 智明²¹ 柴田科学株式会社 (〒340-0005 埼玉県草加市中根 1-1-62)² 国立研究開発法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Development of Mie scattering lidar for measuring aerosols
in indoor factory environment

Nobuyuki Sanari¹, Youhei Itaya¹, Morihisa Yokokawa¹, Yoshitaka Jin^{*2}, Nobuo Sugimoto²,
and Tomoaki Nishizawa²¹ *Sibata Scientific Technology LTD., 1-1-62 Nakane, Soka, Saitama 340-0005*² *National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506*

(Received June 10, 2022; revised August 13, 2022; accepted September 15, 2022)

A prototype lidar for measuring the spatial distribution of suspended particulate matter (aerosol) in indoor factory workplaces was built and evaluated in a laboratory. The lidar is a Mie scattering lidar using a third harmonic laser-diode pumped Nd:YAG laser (355 nm). The transmitter and receiver were composed on an optical breadboard and manually scanned on a tripod. The lidar data were recorded together with the angular data from a gyro sensor, and the aerosol distribution was displayed in nearly real-time. The sensitivity was evaluated by measuring the distribution of smoke from incense sticks placed in the laboratory. Based on the results, the possibility of downsizing the lidar system was discussed. Also, a method was studied to display the aerosol distribution in a 3D space in combination with a small hard-target LiDAR commercially available.

キーワード：環境計測, ライダー, エアロゾル, 粉じん

Key Words: Environmental measurement, Lidar, Aerosols, Dust

1. はじめに

浮遊粒子(エアロゾル)の濃度は室内環境の指標の一つであり¹⁾, 生活の大部分を過ごす室内では吸入曝露の時間が長いことから, エアロゾルの人体への健康影響を把握する上で濃度の計測が重要である²⁾. また, エアロゾルの空間分布を測定することで, 換気や空気清浄機などによる環境改善効果を可視化するなどの応用が可能である. 近年, 地形や構造物(ハードターゲット)の立体構造を計測するライダー(いわゆるLiDAR)が広く用いられるようになってきているが, 室内環境のエアロゾル(ソフトターゲット)の計測については, いくつかの報告例³⁻⁵⁾があるものの, 現時点ではあまり普及していないようである. 例えば, Qiuら⁵⁾は, 近距離のPM2.5を測定するため, 可視光レーザーとイメージングカメラを使ったライダーシステムを開発した. 他にも, 近距離エアロゾルを測定するライダーの例として, Ceolatoら⁶⁾は風洞施設内で発生させたエアロゾルプルームを高い時間・距離分解能で測定するバイスタティックライダーを開発している.

Shiina⁷⁾はLEDを光源とした小型ライダーを開発し、近距離(～100 m)のエアロゾルや海波の計測に応用した。これまで筆者らは、エアロゾルの分布を測定するライダーの開発を行ってきた。東アジアの大気エアロゾル観測ネットワーク(AD-Net)の自動連続運転可能な偏光2波長ライダーの開発と製品化などを手がけてきたが⁸⁾、近距離のエアロゾルの分布を手軽に計測できるようなライダー装置を開発することもターゲットの一つとしている⁹⁾。

本論文では、比較的高濃度のエアロゾルが発生するような工場の屋内作業場などにおけるエアロゾル分布の計測を目的とするライダーの開発について報告する。ここでは健康影響に係る工場環境を評価するため、ある程度(数秒～数十秒)時間平均した濃度分布を計測する。対象となるエアロゾルは、溶接ヒューム、オイルミスト、研磨材の吹付け(ショットブラストなど)で発生した粉じんなどを想定している。屋内作業場のエアロゾルの計測では通常は粉じん計が用いられるが、分布を把握することが必要である場合や粉じん計のコンタミネーションが問題になるような状況もあり、遠隔で計測できるライダーへの期待が大きい。ここでは、目に対する安全性が比較的高い紫外レーザー(半導体レーザー(LD)励起Nd:YAGレーザーの第三高調波(355 nm))を光源とする実験システムを構築し、模擬エアロゾルを用いた実験により性能評価を行った。この結果に基づいて、ライダー装置の小型化の可能性の検討を行った。また、3Dマッピング用の市販の小型LiDARと組み合わせて、3D空間の中でエアロゾル分布を表示する手法についても検討を行った。

2. ライダー装置の試作

試作した室内エアロゾル計測ライダー実験システムのブロック図をFig. 1に示す。また、主な仕様をTable 1に示す。実験システムであるため余裕のある仕様となっている。光源はLD励起第三高調波Nd:YAGレーザー(浜松フォトニクスL11038-13)(パルスエネルギー300 μJ, 繰り返し100 Hz)を用いた。受信口径は25 mmで光電子増倍管で検知した。ライダー送受信部は、光学ブレッドボード上に構成し、三脚に載せて手動で水平、垂直スキャンを行った。ライダー受信信号(1000点データ、計測距離15 m分)はデジタルオシロスコープ(Teledyne LeCroy WaveSurfer 10)(8 bit, 10 Gsps)で記録し、オシロスコープ上で10ショット積算した後でオシロスコープの内臓HDDに保存し、データ収集・データ処理用コンピュータに転送して記録した。室内エアロゾルの計測では、壁面の散乱強度がエアロゾル散乱に比べて桁違いに大きいので、壁面の散乱が受信視野から外れるように送受信ビームの方向を調整した。壁面からの散乱を受信視野から外すため、送受信の光軸間の距離を取り(ここでは約150 mmとした)、受信系を送信側に約50 mradだけ傾けて

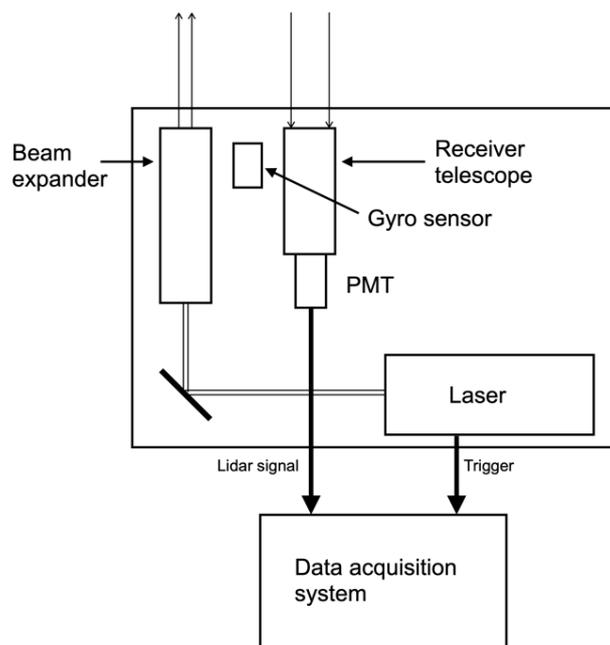


Fig. 1 Block diagram of the experimental indoor lidar.

Table 1 Specification of the experimental indoor lidar.

<u>Transmitter</u>	
Laser	Hamamatsu L11038-13
Wavelength (nm)	355
Pulse energy (μJ)	300
Pulse repetition (Hz)	100
Pulse width (ns)	~1.0
Transmitted beam diameter (mm)	10
Transmitted beam divergence (mrad)	~0.5
<u>Receiver</u>	
Diameter (mm)	25
Field-of-view (mrad)	100
Optical filter bandwidth (nm)	1.0
Neutral density filter optical density at 355 nm	2.5
Detector	Photomultiplier tube (Licel PM-HV-R9880)
<u>Data acquisition</u>	
Transient recorder	8 bit digital oscilloscope (Teledyne LeCroy WaveSurfer 10)
Sampling rate (Gsp/s)	10
<u>Gyro sensor</u>	
Sensor	Yoctopuce Yocto-3D
Sensitivity (deg)	0.1
Precision (deg)	0.1

いる。実際の調整では、ライダーから約3mの位置にハードターゲットを設置し、受信望遠鏡の向きを調整した。また、受信視野を広く(100 mrad)することで近距離からの信号も受信できるようにしている。本システムではライダーから約2mの距離からのライダー信号を受信することが可能である。ライダー測定の方向(方位角・高度角)はブレッドボード上に設置したジャイロセンサで計測し、ライダーデータと同時にデータ収集・データ処理用コンピュータに取り込んだ。ライダー実験システムの写真をFig. 2に示す。

3. 室内エアロゾルの測定実験

実験室内に置いた線香の煙を用いて測定実験を行った。実験の配置をFig. 3に示す。線香から約2m離れた場所に粉じん計(柴田科学LD-5R)を設置し、この計測値をその場所におけるエアロゾル重量濃度のトゥルスデータとした。粉じん計からさらに約1mの場所に空気清浄機を設置した。空気清浄機の吸引により、線香の煙は空気清浄機側に緩やかに拡散した。ライダー測定は、三脚上の送受信部を手動で水平および垂直にゆっくり掃引して行った。手動であるので掃引速度は一定ではないが、ジャイロセンサから十分な精度で方位角・高度角データが得られるので、コンピュータ上で対応する精度で空間分布を再現できる。

ライダーデータからエアロゾル重量濃度を以下の方法で推定した。まず、ライダーデータから背景光雑音を除去する。次に距離2乗補正を行ない、減衰後方散乱係数に比例する量を求める。測定は近距離であるので、信号の減衰は無視できる。距離2乗補正信号は空気分子のレイリー散乱とエアロゾルのミー散乱の和である。前者はほぼ一定で、後者はエアロゾル重量濃度に比例すると考えられる。そこで、粉じん計の近傍のライダーデータを測定し、まず十分にエアロゾル濃度が低く粉じん計の値が $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満(検出限界以下)となる場合の距離2乗補正信号からレイリー散乱成分を推定する。次に、エアロゾル濃度の高いデータ(今回の実験では最大 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$)について、距離2乗補正信号からレイリー散乱成分を引いた値と粉じん計の

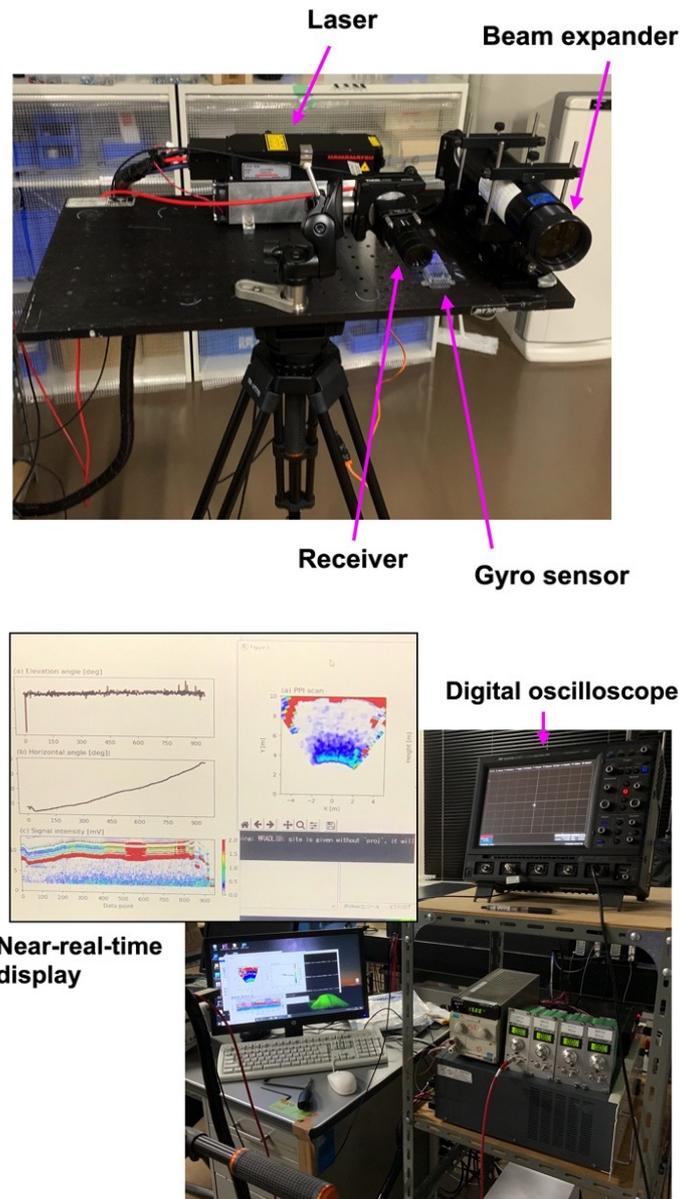


Fig. 2 Photographs of the experimental indoor lidar system. (Top) Transmitter receiver system, (bottom) data acquisition and analysis system.

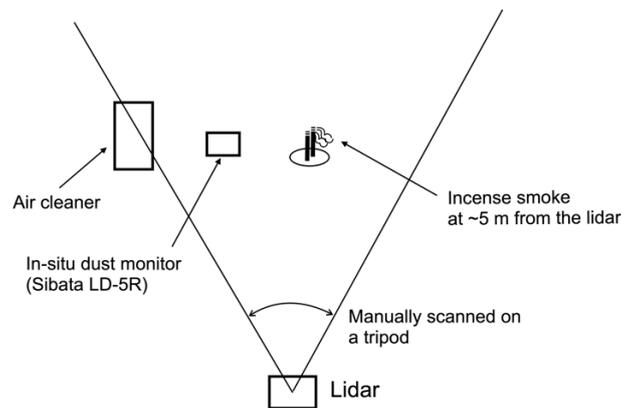


Fig. 3 Setup (top view) for the indoor lidar test experiment.

重量濃度の対応を調べ、重量濃度への換算係数を求める。この換算係数をスキャン全域に適用して重量濃度の分布を求める。

距離 2 乗信号はライダー方程式から以下の式で表される^{10,11)}。

$$X(r) = P(r)r^2 = K[\beta_1(r) + \beta_2(r)]T(0, r)^2 \quad (1)$$

ここで、 P は背景光雑音を除去した後の受信信号強度、 r はライダーからの距離、 K はレーザーエネルギーなどで決定されるシステム定数である。 β は後方散乱係数で下付き文字の 1 と 2 はそれぞれエアロゾル成分と大気分子成分を表す。 T はライダーから距離 r までの大気透過率で、光が往復するため 2 乗としている。ここでは、近距離であるため大気透過率は 1 とすることができる。エアロゾル重量濃度を算出するためには、ライダーデータから後方散乱係数を抽出し、粉じん計と比較する必要がある。本研究では、線香の煙が無いクリーンな場合をエアロゾルフリーと仮定し、エアロゾルフリー信号との強度比を計算することで、後方散乱係数を抽出した。

$$\beta_1(r) = \beta_2 \left[\frac{X(r)}{X_2(r)} - 1 \right] \quad (2)$$

ここで、 X_2 はエアロゾルフリー信号を表す。なお、(2) 式中の $X(r)/X_2(r)$ は全後方散乱とレイリー散乱後方散乱の比（後方散乱比）である。

重量濃度の分布 $M(r)$ は (3) 式のように β_1 に比例すると仮定する。

$$M(r) = C_{MB}\beta_1(r) \quad (3)$$

ここに、 C_{MB} は換算係数で、粉じん計とライダーの比較により求めた。エアロゾルの重量濃度が $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ のとき受信信号強度はエアロゾルフリー時の約 2 倍、すなわち後方散乱比は約 2 であった。355 nm のレイリー散乱の後方散乱係数は約 $7.5 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ であるので、重量濃度 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に対応するミー散乱後方散乱係数は約 $7.5 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ である。すなわち、後方散乱係数—エアロゾル重量濃度換算係数 C_{MB} は $2.0 \times 10^5 (\mu\text{g}/\text{m}^3)/(\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1})$ となる。

4. 結果と考察

掃引測定により得られたエアロゾルの分布を Fig. 4 に示す。Fig. 4 (a) が水平スキャン、Fig. 4 (b) は Fig. 4 (a) の点線に沿った垂直スキャンである。重量濃度をカラースケールで表示している。Fig. 4 (a) に線香の位置、粉じん計の位置を示した。Fig. 4 (b) の点線は水平スキャンの面の位置を表す。線香の煙は線

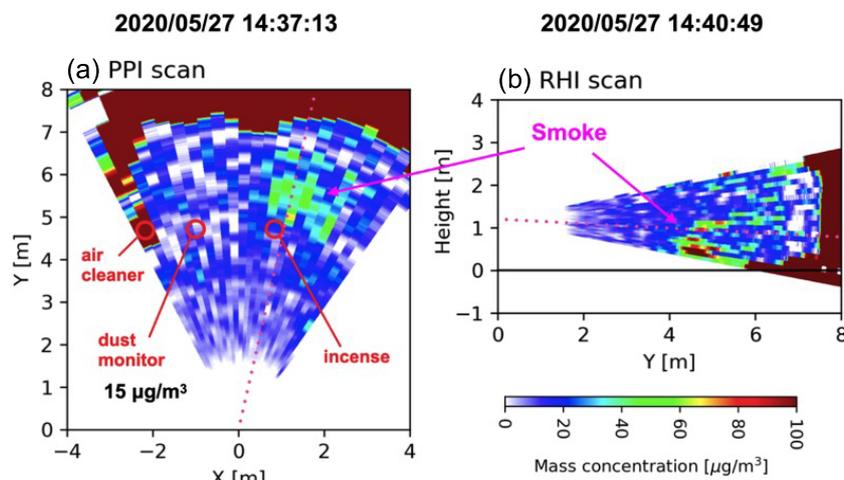


Fig. 4 Spatial distributions of aerosol mass concentration obtained from the horizontal and vertical scan measurements. (a) Plan Position Indicator (PPI) scan and (b) Range Height Indicator (RHI) scan.

香の位置から右奥方向に広がっている。濃い部分で濃度は約 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。粉じん計の位置での重量濃度は $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。遠距離の非常に強い信号は壁面の散乱によるものである。受信視野から外しているにもかかわらず、壁面の散乱は大きく測定されている。なお、この実験ではエアロゾルの散乱が適当な信号レベルとなるように受信系に ND フィルタ（減光フィルタ）を用いて調節した。壁面の信号は AD 変換のレンジを超えて飽和しているがエアロゾルと比べて 2 桁以上大きい。

エアロゾルの分布を室内空間の中で明確に把握するために、ハードターゲットの 3D マッピングを行う LiDAR と併用して、同一のデータ空間のなかでエアロゾル濃度分布を表現することが有用である。ここでは、インテル社の LiDAR (L515) を用いて実験室の 3D データを計測し、その 3D 空間の中にエアロゾル分布を表示する方法を検討した。Fig. 5 に Fig. 4 に示したスキャン面を表示した一例をしめす。3D データの中の色々な場所から色々な角度、あるいは断面で分布を見ることができるので、構造物との位置関係などを明瞭に把握するために有用である。なお、L515 は今回発生させたエアロゾルには感度が無く、3D データには表示されていない。

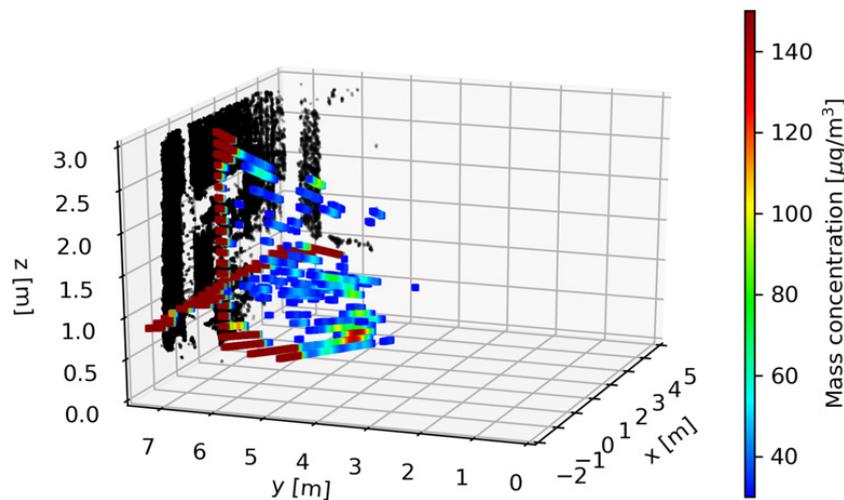


Fig. 5 Example of 3D indication combining the aerosol lidar data (color scale) and the 3D mapping data from a commercial LiDAR (black points). The aerosol lidar data are the same as in Fig. 4. Brown areas indicate strong scattering from the wall and the floor measured by the aerosol lidar.

室内エアロゾルライダーでは壁面の散乱が非常に大きいことを述べたが、以下に、エアロゾルと壁面の信号の大きさを定量的に比較する。いま、重量濃度が $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ の場合を考えるとその後方散乱係数は約 $5 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ となる。一方、Lambertian のハードターゲット¹²⁾では、後方散乱係数は、 $R/\pi\Delta$ (R は反射率、 Δ はレーザーの折り返しパルス長) であるので、反射率を 0.3 程度、レーザーの折り返しパルス長（距離分解能）を 0.3 m とすると後方散乱係数は $0.3 \text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ となる。したがって、信号強度は 4 桁程度違うことが分かる。以上のことから室内エアロゾルライダーでは、例えば、送信ビームの裾の微弱な迷光がハードターゲットに当たってゴースト信号になるような現象に注意が必要である。したがって、送信ビーム形状や受信視野に注意が必要である。また、一般に、フラッシュライダー方式（送信ビームを広げて、広い視野のライダーイメージを同時に受信する方式）では室内のエアロゾル測定は難しいことが推測される。測定対象であるエアロゾルよりも近距離にもハードターゲットがあるような場合には、ハードターゲットの散乱を含む多重散乱が別の方向のエアロゾル計測に干渉する可能性がある。

本研究において試作したライダーにより、室内で発生させた模擬エアロゾルが十分な感度で測定できることが確認された。実際のターゲットとして想定している工場環境では濃度が数倍以上高いと想定される¹³⁾ので、現システムが十分に活用できると考えられる。想定している工場環境ではエアロゾル濃度が数十 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~ 数 mg/m^3 であるため、今回の実験のケースは測定下限値の濃度といえる。その一方で、現在の実験システムは透過率 0.3% の ND フィルターにより受信光を減光する余裕を持った仕様であり、また光学部品等

が最適化されていないので、さらに小型化が可能である。現システムのレーザーパワーは平均パワー30 mWであるが、実験では0.3%のNDフィルタを用いており、これを外せば(背景光雑音が小さいショットノイズリミットであれば)平均パワー0.1 mWのレーザーで同じ性能が得られることになる。したがって、さらに小型のLD励起第三高調波Nd:YAGレーザーが使用できるので、ライダー送受信部はハンドヘルド型とすることも十分可能である。

装置の小型化の他に、測定機能の拡張も考えられる。まず考えられるのは、偏光解消測定機能の追加による非球形粒子の検知である。これによって、鉱物粒子や研磨くずなどを感度良く検知できる可能性がある。また、散乱を多数の散乱角で同時に受信するマルチスタティックライダー方式を用いてエアロゾル粒子の粒径分布測定の可能性もある¹⁴⁾。測定が近距離なので、一つの送受信部に複数の受信系を組み込むことができると考えられる。さらに、蛍光を測定することによって、蛍光性のエアロゾル粒子(ある種の鉱物粒子、プラスチック、繊維など)の分布を測定する可能性も考えられる^{15,16)}。これらについては、今後、測定のニーズを考慮して検討を進める考えである。

5. おわりに

ミー散乱ライダーによる室内エアロゾル測定について実験的な検討を行い、今後、実際の作業現場における応用につながるポジティブな結果を得ることができた。ライダー自体としては非常にシンプルなものであるが、エアロゾルの散乱が部屋の壁面の散乱に比べて数桁小さいことによる問題など、室内ライダー特有の留意点を明確にすることができた。また、ハードターゲットの3Dマッピング用の小型のLiDARを併用して同じ3D空間内にエアロゾル分布を表示する手法は、構造物とエアロゾル分布の関係の把握などに有用で、今後、このような利用手法が広く用いられると期待される。さらに、粒子の非球形性や粒径の測定、蛍光測定など、ライダー手法としての拡張の可能性も考えられる。今後、実際の作業環境などにおいて実証試験を行い、さらに研究開発を進める計画である。

引用文献

- 1) 関根嘉香, 蘆原滉稀, 三澤和洋, “大気中の微粒子およびその室内への侵入,” 室内環境. **23** (2), 121-127 (2020).
- 2) A. J. Koivisto, K. I. Kling, O. Hänninen, M. Jayjock, J. Löndahl, A. Wierzbicka, A. S. Fonseca, K. Uhrbrand, B. E. Boor, A. S. Jiménez, K. Hämeri, M. D. Maso, S. F. Arnold, K. A. Jensen, M. Viana, L. Morawska, and T. Hussein, “Source specific exposure and risk assessment for indoor aerosols,” *Sci. Total Environ.* **668**, 13-24 (2019).
- 3) 北藤典也, 矢吹正教, “高距離分解能マルチスペクトル検出器を用いたミー・ラマンライダーの開発,” 第36回レーザーセンシングシンポジウム, 11 (2018).
- 4) 齊藤保典, 小林一樹, “ライダー法による衣服類脱着等の日常動作における付着ダスト放出状況の実時間空間分布観察,” 日本家政学会誌. **72** (11), 730-738 (2021).
- 5) Y. Qiu, S. Tao, X. Yun, W. Du, G. Shen, C. Lu, X. Yu, H. Cheng, J. Ma, B. Xue, J. Tao, J. Dai, and Q. Ge, “Indoor PM2.5 profiling with a novel side-scatter indoor lidar,” *Environ. Sci. Technol. Lett.* **6** (10), 612-616 (2019).
- 6) R. Ceolato, A. E. Bedoya-Velásquez, and V. Mouysset, “Short-range elastic backscatter micro-lidar for quantitative aerosol profiling with high range and temporal resolution,” *Remote Sens.* **12**, 3286 (2020).
- 7) T. Shiina, “LED mini lidar for atmospheric application,” *Sensors.* **19** (3), 569 (2019).
- 8) 杉本伸夫, “エアロゾル計測用ライダーシステム,” レーザーセンシング学会誌. **1** (1), 4-13 (2020).
- 9) N. Sugimoto, T. Nishizawa, Y. Jin, N. Sanari, Y. Itaya, and M. Yokokawa, “Development of compact backscattering lidars for aerosol monitoring applications including indoor use,” *Proceedings of Optics and Photonics for Sensing the Environment, ETu3E.3* (2020).
- 10) R. M. Measures, “*Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications*,” John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (1984).
- 11) C. Witkamp (ed.), “*Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*,” Springer Series in Optical Sciences, Springer (2005).
- 12) K. N. Liou, “*An Introduction to Atmospheric Radiation (2nd Ed.)*,” Academic Press Inc., Elsevier (2002).
- 13) 大谷吉生, “大型建機製造工程で発生する溶接フェュームの測定,” エアロゾル研究. **33** (4), 233-237 (2018).
- 14) Y. Jin, N. Sugimoto, T. Nishizawa, T. Yoshitomi, A. Sawada, W. Sarae, A. Hattori, Y. Yamasaki, H. Okamoto, and K. Sato, “Measurement of water mist particle size generated by rocket launch using a two-wavelength multi-static lidar,” *Appl. Opt.* **58** (23), 6274-6279 (2019).

- 15) N. Sugimoto, Z. Huang, T. Nishizawa, I. Matsui, and B. Tatarov, "Fluorescence from atmospheric aerosols observed with a multi-channel lidar spectrometer," *Opt. Express*. **20** (19), 20800–20807 (2012).
- 16) 齊藤保典, "蛍光分光法と地球環境センシング技術としての蛍光ライダーへの適応事例," レーザセンシング学会誌. **2** (2), 53–66 (2021).

左成信之

1995年柴田科学器械工業株式会社(現 柴田科学株式会社)に入社。現在まで大気・室内環境測定機器及び労働衛生測定機器の開発に従事。環境省の黄砂対策事業として2004年に富山県環境科学センターに設置したライダー装置以来、ライダー関連装置の開発に携わる。レーザセンシング学会会員、応用物理学会会員。