

低コヒーレンスドップラーライダーによる粉塵の粒径分布推定

大久保 洗祐, ノフェルラゴロサス, 椎名 達雄
千葉大院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

Particle size distribution estimation of dust particles using low coherence Doppler lidar

Kosuke Okubo, Nofel Lagrosas and Tatsuo Shiina
Chiba Univ., 1-33, Yayoicho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8522

Abstract: In this work, we propose a low-coherence Doppler lidar (LCDL) to measure dust flow at near-surface atmosphere. High speed and resolution measurement is necessary to get dust flow distribution near the ground. Dust flow is measured with a LCDL, and LCDL results is found good agreement in the 0-5 m/s range compared to the anemometer. In order to investigate the effect of particle size and the mass of dust particle, a simulation of dust dispersal and falling is conducted. The simulation results and LCDL results are in good agreement. results. So, the dust particle size distribution can be estimated from LCDL results.

Key Words: Doppler, Lidar, DFB-LD, Low-coherence, Dust

1. はじめに

低層大気の流れを可視化し、風のダイナミクスを捉えることは地質と大気との混合・相互作用を知るうえで重要である。低層大気の流れは地形や構造・構成物によって、局所的で急峻な場として複雑に形成され、地表面に堆積した粉塵が複雑に飛散する。その粉塵の飛散は、環境保全のみならず、呼吸器疾患などの人間の健康や、都市部における人為的な粉塵による大気汚染など、大きな問題となっている¹⁻³⁾。従来のダストサンプリングでは一定時間ごとの捕集であり、粉塵の流れといったリアルタイムな情報を得ることに課題がある。シートレーザーを用いた粒子追跡速度計測もあるが^{4,5)}、周囲を暗くする必要があり大きな制約もあり現場での計測が困難である。地上付近の粉塵を検出するには、測定中に風場を乱すことがないリモートセンシングが最適であり、ドップラーライダーが挙げられる。

空港などで扱われているコヒーレントドップラーライダーは鉛直上空の風の流れが対象であり 200m から数 km の広い測定範囲で長時間積算する必要がある。これは大気の流れが高度に依存して高いほど大きな塊として動き、空間・時間スケールが大きくなることによる。一方で地表近くでは大気の流れの空間・時間スケールが小さく既存のコヒーレントドップラーライダーは計測に適さない。低層大気の流れ・粉塵の挙動をモニタリングするには高分解能かつ高速に計測する必要がある。

本研究では低層大気の流れを空間分解能 1m で水平計測することを目的とした Low-Coherence Doppler lidar (LCDL) の開発を進めている。本報告では、約 1m の風洞内に粉塵を散布し、LCDL で測定した結果から得られた粉塵の粒径分布について評価する。

2. 低コヒーレンスドップラーライダー

Figure 1 に示すように LCDL は、送信系、受信系、ファイバ光学系、ホモダイン検出系、信号処理系で構成した。光源に 975nm の DFB-LD パルク素子 (浜松ホトニクス LE0697CWLD) を用いた。DFB-LD の駆動電流と温度を制御することで光出力とコヒーレンス長を調整した。駆動電流 2A、温度 35°C のとき、コヒーレンス長 0.8m となり、その時の光出力は約 0.7W である⁶⁾。送信系では、DFB-LD からの光の一部をビームスプリッターで参照ファイバに導入する。参照光強度は約 1mW である。受信系には、口径 61mm の屈折式望遠鏡を用いた。ファイバ光学系では、50 : 50 のファイバカップラー上で参照光と受信光との干渉計によるホモダイン検出を行う。参照光路に用いるファイバの長さを変更することで任意に計測距離を決定できる。信号処理系で高速フーリエ変換 (FFT) 分析を行う。サンプリングレートは 250MSa/s で、波形捕捉時間は 5ms である。各 FFT フレームは 10 μ s で、500 フレームを平均化することで平滑なドップラーシフト信号が生成する。FFT 解析による周波数分解能は 0.1MHz である。表 1 にライダーのパラメータをまとめる。

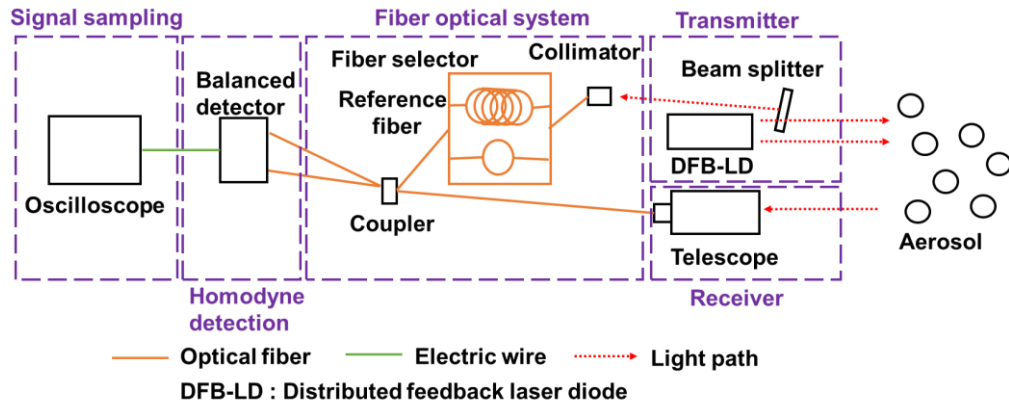


Fig.1. Schematic of LCDL. LCDL consists of transmitting, receiving, fiber optical system, homodyne detection, and signal processing.

Table 1 Specifications of LCDL.

Component	Qualification	Specification
Transmitter	Center wavelength	975nm
	Laser power	0.7W
	Coherence length	0.8m
	(Drive current, temperature)	(2A, 35°C)
Receiver	Diameter of aperture	0.061m
	Light receiving sensitivity of Balanced detector(PD)	0.75A/W@λ=1.0μm
	Sampling rate	250MSa/s
	Sampling time	5ms

3. 粉塵速度計測

長さ 130cm、一辺 30cm の正方形の風洞の中で、サーキュレータを用いて粉塵を水平方向に飛散させ LCDL による粉塵速度計測を行った。実験に用いた粉塵は、小麦粉と炭酸カルシウム粒子である。風洞は LCDL から約 6m 離れた場所に設置した。サーキュレータからの風向はライダーの視線方向に対し向かい風である。風洞内に風速計 (testo 405i Smart Probe) を設置し、LCDL で測定した粉塵速度と比較する。サーキュレータの手前の位置から粉塵を振り落とし、風によって粉塵を風洞内に飛散させる。また風洞内に 25cm 間隔で 5 つのトレイを配置し、振り落とされた粉塵の重量を測定した。Fig.2 には粉塵の重量分布を示す。1 分間に振り落とされた小麦粉は約 200g、炭酸カルシウムは約 130g である。粉塵散布位置は 0cm であり、炭酸カルシウムは 0cm 付近に集中しているが、小麦粉は広範囲に広がっている。

風速 0~5m/s の範囲で LCDL の測定速度と風速計の結果は良好な線形一致を示した。LCDL で取得した小麦粉の速度幅は約 0.7~1m/s であるのに対し、炭酸カルシウムの速度幅は約 0.3m/s と狭かった。この差は、粉塵の持つ粒径や物質質量など固有の性質によると考えられる。

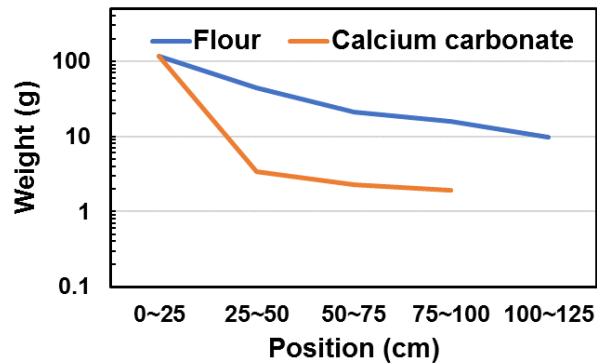


Fig. 2. Relationship between dust collection position and weight of Flour and Calcium carbonate.

4. 粉塵の粒径分布推定

Fig. 3 は粉塵重量分布の実験結果を基に計算した粒径分布である。粉塵の粒子数は小麦粉の密度 600kg/m^3 と炭酸カルシウムの密度 2600kg/m^3 として Fig. 2 から求められる。LCDL の干渉距離は 80cm であり、干渉信号の大きさは干渉信号分布によって変化するため、ガウス分布を仮定し掛け合わせている。小麦粉のモード半径は $9\mu\text{m}$ 、炭酸カルシウムのモード半径は $14\mu\text{m}$ と推定された。

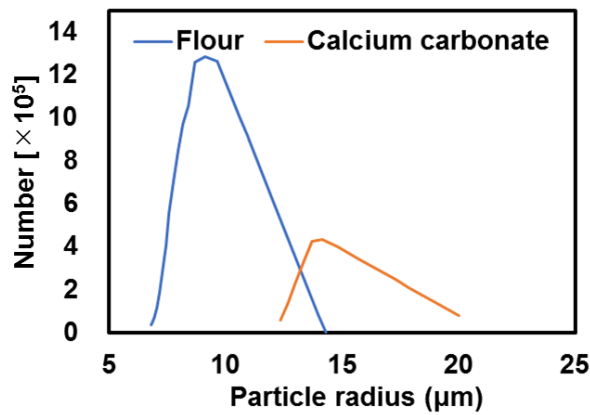


FIG. 3. Particle size distribution. The vertical axis represents the number of particles, and the horizontal axis represents the particle size.

粒子の落下位置は粒子径、比重、風速に依存するため、ドップラー周波数（速度）と粒子数の関係を導出することができる。粉塵の粒径や物質量が飛散状況に影響を与えるか調べるために、粉塵が飛散して落下するシミュレーションを行った。シミュレーションは粘性抵抗による落下を想定した。Fig. 4 では粉塵の重量分布に基づいたシミュレーション結果を示す。実線は LCDL による結果を示す。点線で示された三角形の範囲は Fig. 3 で求めた粉塵の粒径分布を反映している。ドップラー周波数のピークが中心から高周波側にシフトしているのは、粒子のモード半径が粒径分布に対して中心ではなく、小さい方に偏っていることが寄与している。

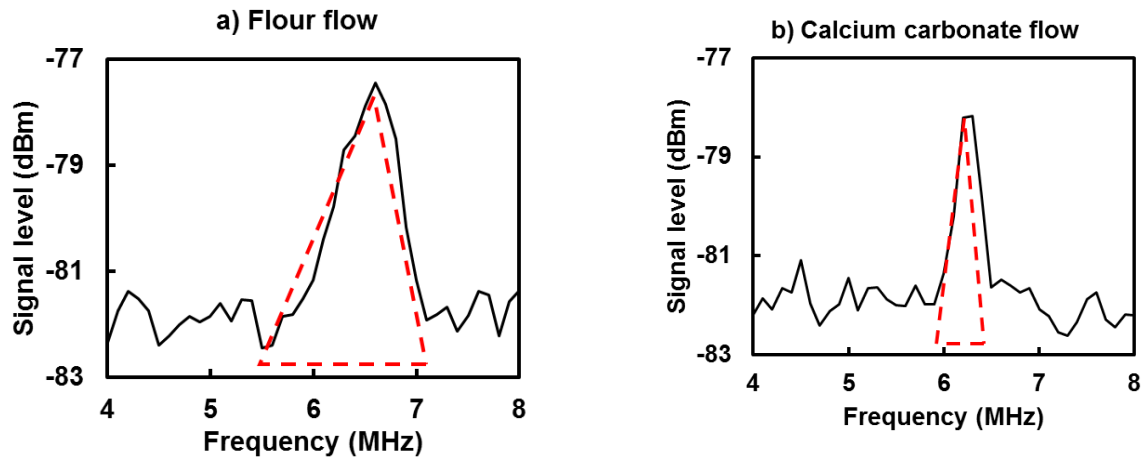


Fig.4. Doppler signal of a) Flour and b) Calcium carbonate.

5. まとめ

本研究では、LDCL システムが高い時間・空間分解能で地上付近の粉塵の挙動を測定でき、粉塵の粒径分布を推定できることを示した。また、LCDL は異なる粉塵を監視することができ、実験条件下でのシミュレーションにより、速度幅の違いは粉塵粒子の半径と質量に起因することが示された。LCDL は粉塵挙動の詳細をリアルタイムで可視化することができ、地表近くの粉塵と低層大気との混合・相互作用に関する議論につながります。今後はさらにシステムの感度を向上させ、より低濃度の自然ダストを検出できるようになることが期待される。また実際のフィールドワークで粉塵の動きをモニタリングする。

参考文献

- 1)Gregorio E, Atmospheric environment 82 (2014), p.83-93.
- 2)Byung Mook Weon and Jung Ho Je, , Applied physics letters 96 (2010), 19410
- 3)Robin Singh, Peter Su, Lionel Kimerling, Anu Agarwal and Brian W. Anthony, Applied physics letters 113 (2018), 231107.
- 4)W.B. Johnson, F.L. Ludwig, W.F. Dabberdt, R.J. Allen, Journal of the air pollution control association 23(6) (1973), p.490-498.
- 5)Weifeng Diao, Xin Zhang, Jiqiao Liu, Xiaopeng Zhu, Yuan Liu, Decang Bi, Weibiao Chen, Chinese optics letters 12(7) (2014), 07280181-072801.
- 6)Tatsuo Shiina, *Proc. 19th Coherent Laser Conference*, 2018.