

低コヒーレンスドップラーライダーによる粉塵速度計測

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

Dust velocity measurement by 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 wind speed of dust at near-surface atmosphere. High speed and resolution measurement is necessary to get wind information near the ground. We conducted lab-experiment and measured dust (flour and CaCO_3) velocity by LCDL. The dust speed calculated from peak of Doppler signal was 1.7~1.8 m/s. Anemometer result (about 1.7m/s) shows good agreement with LCDL results. We observed that the width of the Doppler shifted frequency from flour measurement is wider than that of CaCO_3 .

Key Words: Doppler, Lidar, Wind, Low-coherence, Dust

1. はじめに

ドップラーライダーは大気中で動いている流体から風情報を遠隔に獲得できる手法として広く用いられている。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場合が対象であり 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。一方で地表近くの生活圏での風計測の需要も大きいものの¹⁾、大気の時空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。高分解能かつ高速に計測する必要がある。

本研究では低速大気を空間分解能 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²⁾。本報告では、約 1m の風洞内に粉塵を散布し、LCDL で測定した粉塵速度について評価する。

2. 装置

LCDL は送信光学系、受信光学系、ファイバ光学系、ヘテロダイン検出、信号処理系で構成した。送信光学系では光源として 976nmDFB-LD のバルク素子 (浜松ホトニクス) を用いた。出力は約 0.7W である。DFB-LD の駆動電流 (2A) と素子温度 (35°C) を制御することで 0.8m のコヒーレンス長を得た。受信光学系では開口径 61mm の屈折式望遠鏡を用いた。ファイバ光学系では参照光と後方散乱光をファイバケーブル上でヘテロダイン検波を行う。信号処理系では FFT 解析を行う。サンプリングレートは 250MSa/s であり波形捕捉時間は 5ms である。FFT の 1 フレームは 5 μ s であり平均回数は 1000 回である。表 1 に本ライダーのパラメータをまとめる。また Fig.1 に本ライダーの構成図を示す。

Table 1 Specifications of Low-coherence Doppler lidar.

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

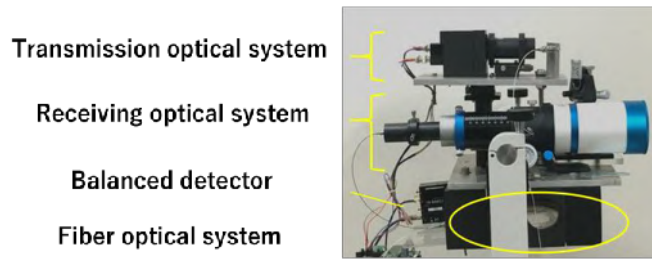


Fig.1 Low-coherence Doppler lidar configuration.

3. 低コヒーレンス光源と原理

低コヒーレンス光源による干渉波形（インターフェログラム）は以下の式によって示される。

$$G(\tau) = \exp\left[-\left(\frac{\pi\Delta\nu\tau}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right] \exp(-j2\pi\nu_0\tau) \quad (1)$$

このコヒーレンス長は次式で表される。

$$l_c \approx 0.44 \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

ここで、 λ_0 は光源波長、 $\Delta\lambda$ は線幅である。

976nmDFB-LDの線幅は最大10pmほどで、これはコヒーレンス長0.04mにとどまる。マイケルソン干渉計を用い駆動電流と素子温度を制御してコヒーレンス長と出力の調整をはかったところ最大0.8mを得た²⁾。この時線幅は約0.5pmと計算される。

ドップラーライダーは光のドップラー効果で風速情報を得る³⁾。

$$\Delta f = 2 \frac{V}{\lambda_0} \quad (3)$$

Δf はドップラーシフト周波数、 V は移動速度である。

送信光は大気中を伝搬し Δf を含んだ後方散乱光が望遠鏡で集光されファイバケーブルに入る。送信光の一部を参照光として取り出し、計測距離に応じた長さのファイバに導く。参照光と受信光がファイバケーブル上で重なりヘテロダイン検波を行う。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。

4. 粉塵速度計測

LCDLの速度精度は定速回転するリトロリフレクターを移動体として計測したところ移動速度0.5m/s～10m/sの範囲で、誤差0.1m/sであった²⁾。また Δf の幅は0.18MHzで、速度範囲は0.10m/s分であった。

風計測の室内実験として、全長130cm・直径30cmの風洞内に、サーキュレーターを用いて粉塵を散布してドップラーシフト計測を行った。実験に用いた粉塵は小麦粉（薄力粉）と炭酸カルシウムである。風洞はLCDLから約6m離れた位置に設置した。サーキュレーターによる風向きはライダーの視線方向に対して向かい風である。風洞内には風速計(testo 405i Smart Probe)を設置し、LCDLで計測される各粉塵の速度と比較した。Fig.2に小麦粉を散布したときの計測結果とその時の風速情報を、Fig.3に炭酸カルシウムを散布したときの計測結果とその時の風速情報を示す。小麦粉の Δf は2.46～4.01MHzでピーク位置は3.76MHzであった。これを速度に換算すると、速度範囲が1.20～1.95m/sでピーク速度は1.83m/sである(Fig.2(a))。風速計による結果は5分間の平均速度が1.74m/sであり速度範囲が1.32～2.07m/sであった(Fig.2(b))。両者とも良好な一致が得られた。同様に炭酸カルシウムの Δf は3.54～3.95MHzでピーク位置は3.68MHzであった。これを速度に換算すると、速度範囲が1.73～1.92m/sでピーク速度は1.79m/sである(Fig.3(a))。風速計による結果は5分間の平均速度が1.66m/sであり速度範囲が0.99～2.11m/sであった(Fig.3(b))。小麦粉と異なり、炭酸カルシウムの Δf は速度幅が狭い結果が得られた。小麦粉（薄力粉）の比重は0.6前後であるのに対して炭酸カルシウムの比重は2.6である。また小麦粉の平均粒径は11 μ mに対し炭酸カルシウムは6 μ mであった。小麦粉は比重が小さい上に、粒径が大きいことで舞いやすく長い時間空中に漂った。一方炭酸カルシウムは小麦粉ほど空中に漂わず均一に近づいたことで速度範囲は狭くなったと考えられる。そのスペクトル幅は定速回転するリトロリフレクターの速度幅より大きくなった。LCDLは5ミリ秒で高速計測したことで、この違いが大きくなった。

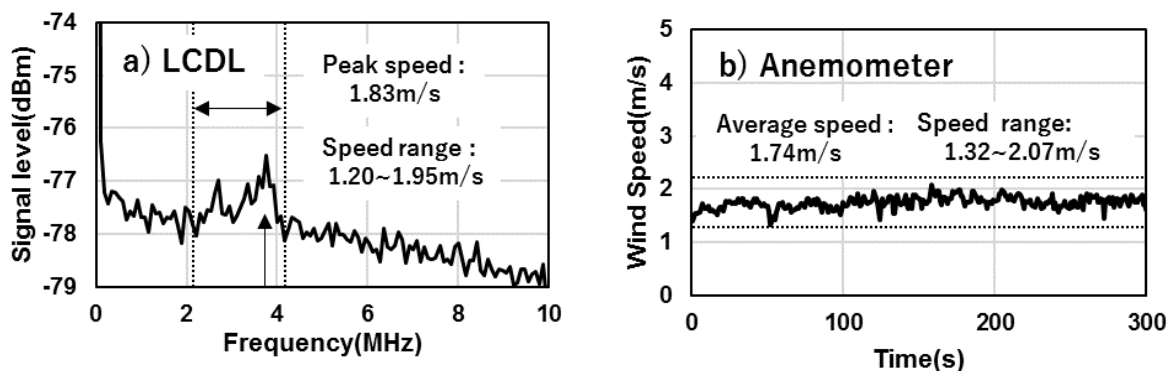


Fig.2 a) Doppler signal (flour). b) wind speed by Anemometer.

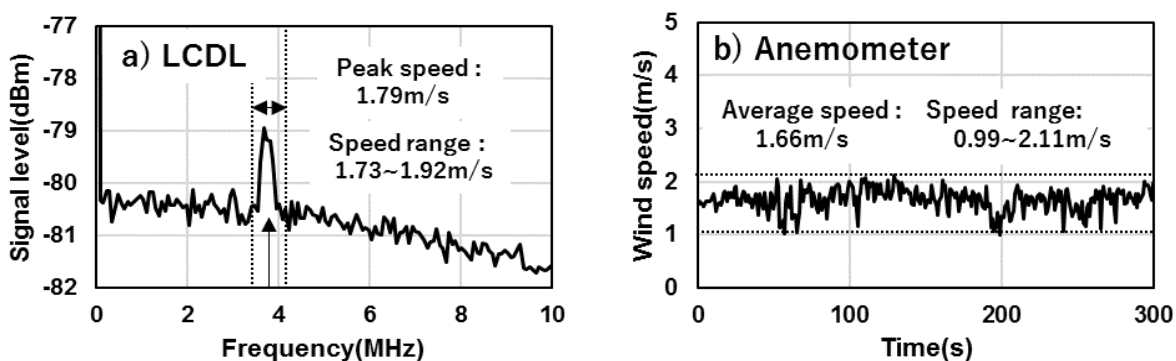


Fig.3 a) Doppler signal (CaCO_3). b) wind speed by Anemometer.

5. まとめ

LCDL を開発し、時間・空間スケールの小さい粉塵速度計測を行った。粉塵として小麦粉と炭酸カルシウムを用い、それぞれから得られたドップラー信号は粉塵の舞い方の違いから幅の異なる結果であった。LCDL と風速計の結果は良好な一致を示した。

現在理論と実験感度の照合を図っており、より高感度化することでエアロゾルの風計測を進める予定である。

参考文献

- 1)吉永,椎名,第 37 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集,2019
- 2)島田,椎名,第 34 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集,2017
- 3)Heng Liu et al., Optical Engineering, 2020