

# 1.5 $\mu\text{m}$ 小型インコヒーレントドップラーライダーの風速測定精度の改善

## Improvement of the wind measurement accuracy for the 1.5 $\mu\text{m}$ compact incoherent Doppler lidar

○柴田泰邦<sup>1</sup>、長澤親生<sup>1</sup>、阿保 真<sup>1</sup>、塚本 誠<sup>2</sup>、誉田高行<sup>2</sup>

Yasukuni Shibata<sup>1</sup>, Chikao Nagasawa<sup>1</sup>, Makoto Abo<sup>1</sup>

Makoto Tsukamoto<sup>2</sup> and Takayuki Honda<sup>2</sup>

1 首都大学東京 システムデザイン研究科、2 英弘精機

1 Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, 2 EKO Instruments

**Abstract:** For the improvement wind accuracy of the incoherent Doppler lidar using a FBG filter, the system error is reduced and the combining efficiency of a telescope and a single-mode fiber is improved. Although the system error of the conventional method over 1 hour was  $\pm 1.27$  MHz (an equivalent for line-of-sight wind velocity  $\pm 1.04$  m/s), that of the improving method achieved  $\pm 0.22$  MHz (an equivalent for that  $\pm 0.19$  m/s) by temperature stabilization of the FBG filter and improvement of the LD wavelength control method. Furthermore, the infrared chromatic aberration which became a problem with the refracting telescope has improved by using a single lens telescope. The experimental result suggested that the efficiency of the single lens telescope with a diameter of 75 mm would be 7.2 times the refracting telescope with a diameter of 107 mm.

### 1. はじめに

距離 1km 内の 3次元風分布測定を行うため、小型インコヒーレントドップラーライダーを開発し、風速の試験観測に成功した<sup>1</sup>。光源にはアイセーフ波長 1.5 $\mu\text{m}$  を用い、小型・軽量化が可能な、光通信用 DFB-LD の cw 光を AOM (Acousto-Optic Modulator) によってパルス状に切り出して EDFA で増幅することにより、狭いスペクトルを維持し、高出力化を実現した。ドップラーシフト成分検出用フィルターには、光源同様に光通信機器として用いられているファイバー・ブラッグ・グレーティング (FBG: Fiber Bragg Grating) を利用している。これら光通信機器を用いることにより、システム全体が光ファイバーで結合されるため、光学系レイアウトの柔軟性が利点である。

FBG フィルターはそれ自身の温度変化により反射特性の中心波長がシフトし、見かけ上のドップラーシフトが生じる。そこで、温度制御により FBG フィルター特性を安定させている。見かけ上のドップラーシフトは 10 分平均で  $\pm 0.68$  MHz (視線方向風速  $\pm 0.56$  m/s 相当)、60 分平均で  $\pm 1.27$  MHz (同  $\pm 1.04$  m/s 相当) と十分ではない。そこで、制御方式を改めることにより、見かけ上のドップラーシフトを軽減させた。

また、FBG フィルターはシングルモードファイバーで構成されているため、受信望遠鏡で受信した光をファイバーのコア径 10 $\mu\text{m}$  内に集光する必要がある。前回、F 値が 9.8 の反射型望遠鏡と F 値が 2.9 の屈折型望遠鏡を用いた比較実験を行い F 値の小さい、つまり焦点位置のスポットサイズが小さい屈折型望遠鏡の受光効率が反射型望遠鏡より優れていることを示した。しかし、前回用いた屈折型望遠鏡は、複数のレンズを組み合わせることで可視域の色収差を補正しているが、赤外領域では最適化されていない。本ドップラーライダーでは単一波長のみ利用することから、単眼レンズを用いた受光用望遠鏡を用いて、受光効率の改善を図った。

### 2. 見かけ上のドップラーシフトの改善

FBG フィルターはシングルモードファイバーのコア内に屈折率変化を持つ格子間隔  $\Lambda$  の回折格子で形成され、Bragg 条件を満たす波長  $\lambda_0$  ( $=2n_{\text{eff}}\Lambda$ ) のみ反射される。ここで、 $n_{\text{eff}}$  は光ファイバーの実効屈折率である。Fig.1 に開発した直接検波小型ドップラーライダーのブロック図を示す。FBG フィルターの一方の傾き部分に波長同調した送信レーザは、送受信兼用の望遠鏡より大気に照射される。大気からの散乱光は望遠鏡で受光され、ドップラーシフト周波数は FBG フィルター透過光  $I_T$  と反射光  $I_R$  の比  $r$  ( $=I_T/I_R$ ) から求めることができる。FBG フィルターの材料である石英ガラスは熱膨張するため、温度変化によって回折格子の間隔が変化し、反射特性の中心波長がシフトする。また、レーザ波長は時間経過と共に変化してしまうため、FBG フィルター特性とレーザの波長変動により生じる  $I_T/I_R$  のずれが見かけ上のドップラーシフト周波数  $\Delta f$  となり、測定精度に大きく影響する。そこで、 $I_T/I_R$  が常に 1.0 となるよう LD 電流にフィードバック制御を行っている。Fig.2 に従来方式と改良方式での  $\Delta f$  の時間変化を示す。従来のシステムでは FBG 温調器が ON/OFF 制御であったため、スイッチング周期に同期した  $\Delta f$  の揺らぎが生じていた。 $\Delta f$  は 10 分平均で  $\pm 0.68$  MHz (視線方向風速  $\pm 0.56$  m/s 相当)、60 分平均で  $\pm 1.27$  MHz (同  $\pm 1.04$  m/s 相当) であった。 $\Delta f$  の 1 時間の安定度は約 1.0 m/s で、統計誤差を含むトータルの風速誤差にすると、目標の 1.0 m/s 以下の測定精度には届かない。そこで、電流制御の温調器に変えるとともに制御プログラム

を改良した。改良方式での $\Delta f$  は10分平均、60分平均とも $\pm 0.22$  MHz(同 $\pm 0.19$  m/s相当)と、 $\Delta f$  が従来の1/3以下に抑制され、1時間にわたって $\Delta f$  の安定度が維持されていることが確認された。

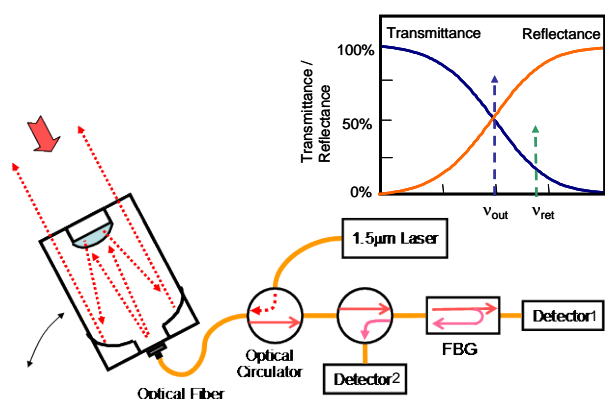


Fig.1 Outline of the direct-detection Doppler lidar system using the FBG filter.

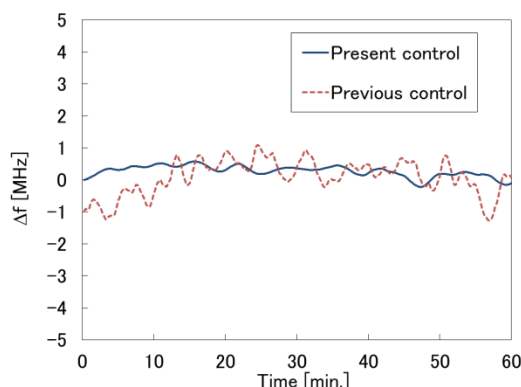


Fig.2 Long term feedback control result.

### 3. 受信効率の改善

シングルモードファイバーの FBG フィルターに受信光を効率よく入射させるため、F 値の小さい口径 107mm の屈折型望遠鏡を用いている。積算数 100,000、仰角 20° の条件で距離 480m まで風速誤差 $\pm 1.0$ m/s 以内の試験観測に成功している<sup>1)</sup>。しかし、用いた屈折型望遠鏡は市販品で、複数のレンズを組み合わせることで色収差を補正しているが、赤外領域では最適化されていないため、スポットサイズはファイバーコア径より大きい。本ドップラーライダーでは単一波長のみ利用することから、凸レンズ一つのみで構成した単眼レンズ望遠鏡を用いて、受光効率の改善を試みた。

Fig.3 に示すように、送信用 LD 光源を直径 50mm の平行光に広げた後、シングルモードファイバーを結合した望遠鏡に直接入射させ、APDにて受光強度を測定した。望遠鏡には、市販の屈折型望遠鏡(口径 107mm, F2.9) と単眼レンズ望遠鏡(口径 75mm, F2.7) を用いている。Table 1 にそれぞれの望遠鏡で受光された APD 出力を示す。単眼レンズ望遠鏡は市販望遠鏡と比較して 14.4 倍の信号強度を得た。ビーム径がそれぞれの望遠鏡の口径より小さいため、受光面積比(49%)を用いて補正した受光効率は 7.2 倍と 1 桁近く改善することが期待できる。

Table 1 Comparison result of signal sensitivity

	Telescope ( $\phi$ 107 mm, F 2.9)	Telescope ( $\phi$ 75mm, F 2.7)
APD output	32 mV	462 mV

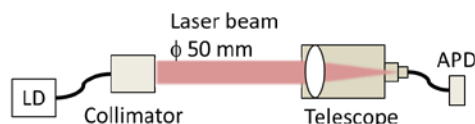


Fig. 3 Block diagram of the comparative experiments of signal sensitivity

### 4.まとめ

1.5 $\mu$ m FBG フィルターを利用した小型インコヒーレントドップラーライダーの測定精度を改善するため、見かけ上のドップラーシフト $\Delta f$  の抑制と受信望遠鏡とファイバーの結合効率の改善を行った。FBG フィルター温度の安定化と LD 波長制御の改善を行うことにより、10分平均の $\Delta f$  を従来の 1/3 以下の $\pm 0.22$  MHz(視線方向風速 $\pm 0.19$  m/s 相当)に抑制した。さらに、従来は1時間にわたる見かけ上のドップラーシフトが $\pm 1.27$  MHz(同 $\pm 1.04$  m/s 相当)であったが、改良法を用いることにより、10分平均と同じ $\pm 0.22$  MHz(同 $\pm 0.19$  m/s 相当)となり、長時間にわたる安定度を維持することが確認された。

従来の屈折型望遠鏡で問題となった赤外での色収差は、単眼レンズ望遠鏡を用いることにより改善する。口径 75mm の単眼レンズ望遠鏡は口径 107mm の屈折型望遠鏡の 7.2 倍の受光効率改善が見込まれることが実験により示唆された。今後、実際のライダー観測により効率改善効果を実証する。

### 参考文献

1. 柴田他、第 28 回レーザセンシングシンポジウム, 58-59, 2010