

小林 喬郎、孫 東松、田中 隆三

Takao KOBAYASHI, Donsong SUN, Ryuzo TANAKA

福井大学 工学部

Faculty of Engineering, Fukui University

Abstract : We have developed a new differential discrimination technique of the Doppler lidar using a high-spectral resolution Fabry-Perot etalon filter to measure wind velocity in the troposphere. The UV third harmonics of the Nd:YAG laser (355nm) was used as the light source for eye-safe applications. The principle, sensitivity simulation and preliminary experimental results are reported. Wind velocity was measured up to 2.5 km range with standard deviation of 0.8 m/s.

1. はじめに

近年、次第に顕著になってきた地球環境問題の解明が叫ばれており、複雑なメカニズムを正確に把握することが必要であり、特に大気の重要なパラメータである気象要素の3次元空間分布を実時間的で高精度に計測するセンシング技術の開発が望まれている¹⁾。本研究では、対流圏での風速の計測を目的として、Nd:YAGレーザーの3倍波 ($\lambda=355\text{ nm}$) を光源として、高分解能エタロンフィルターを用いた新たな差分弁別法によるUV域ドップラーライダーの開発を行った。2チャンネルフィルター化による差分弁別法により、風速の高精度な計測が可能となり、さらに、UV域の波長を用いることによりアイセーフな動作が可能となる。これらのシステムの原理と精度の解析及び予備実験として風速計測の結果を示す。

2. 差分弁別法

Fig. 1にレーザー光と大気中のエアロゾル粒子によるミー散乱光と分子によるレイリー散乱光のスペクトル及び高分解能フィルターの透過率スペクトルを示す。単一周波数のレーザー光に対して、ミー散乱光は風によるドップラーシフトが生じ、このドップラーシフトより風速を求める。また、Fig. 2に開発したドップラーライダーの装置構成を示す。

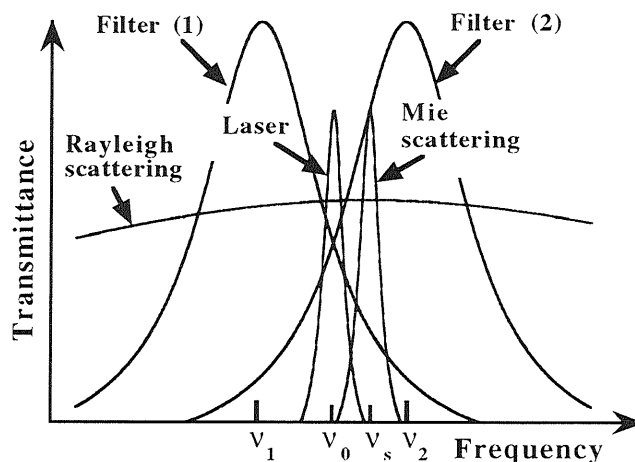


Fig. 1 Spectral profiles of the backscatter signals and filter transmission functions.

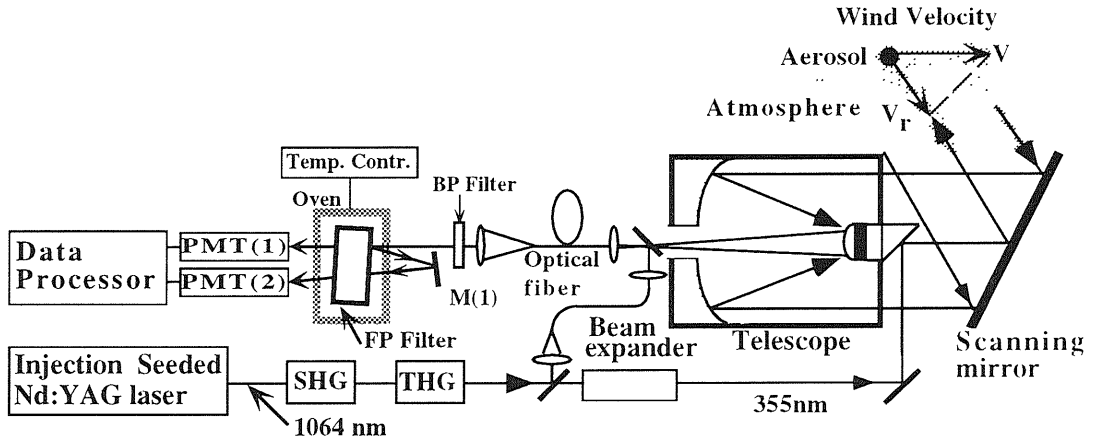


Fig. 2 The UV Doppler lidar system used in the experiment.

本方式は、2つのフィルター(検出器PMT(1)及びPMT(2))からの出力差を求めるもので、FM通信技術における弁別法との対応より差分弁別法と称する。次にその原理を示す。

一般にフィルターの透過率は、その透過関数 $h(v')$ と入射光のスペクトル関数 $f(v-v')$ との畳込み積分で表される。

$$F_i(v) = \int h(v') f(v-v') dv' \quad (1)$$

参照光(レーザー光)の規格化されたフィルター(1)、(2)の透過率を $T_1(v_0)$ 、 $T_2(v_0)$ 、後方散乱光(ミー散乱光)の透過率をそれぞれ、 $T_1(v_s)$ 、 $T_2(v_s)$ とするとこれらの差分値は次式で与えられる。

$$\Delta T_0 = T_1(v_0) - T_2(v_0) \quad , \quad \Delta T_s = T_1(v_s) - T_2(v_s) \quad (2)$$

ここで、レイリー散乱光のスペクトル幅が、フィルター幅と比較して約1/20と狭く、さらに、差分を求めることによりレイリー散乱雑音成分は除去される。また、参照光とミー散乱光の周波数 v_0 と v_s 、及び透過率の微分係数 $\gamma(v)$ は次式で求められる。

$$v_0 = \Delta T_0 / \gamma(v) \quad , \quad v_s = \Delta T_s / \gamma(v) \quad (3)$$

$$\gamma(v) = (dF_2(v) / dv - dF_1(v) / dv) \quad (4)$$

ここで、ミー散乱光が受けるドップラーシフトは

$$v_d = v_0 - v_s \quad (5)$$

として与えられる。

以上、式(5)とドップラー効果の式、 $v_d = (2V_r/c) \cdot v$ により、視線方向の風速 V_r が求まる。ここで、 c は光速であり、レーザー光の傾角を θ とすれば水平方向の風速は $V = V_r / \cos \theta$ と求まる。また、風速の計測感度 Θ は単位速度当りの出力変化として、次式で与えられる。

$$\Theta = \alpha \gamma(v) \quad (6)$$

ただし、 $\alpha = 2/\lambda$ である。また、速度のバラツキ、すなわち標準偏差は次式により求まる。

$$\Delta V = 1 / \{ (S/N) \Theta \} \quad (7)$$

ただし、 (S/N) は信号対雑音比であり、計測信号成分と雑音の光電子数をそれぞれ N_s 、 N_n

として積算回数をnとすれば次式で与えられる。

$$(S/N) = \sqrt{n} N_s / \sqrt{2(N_s + N_n)} \quad (8)$$

この差分弁別法は、従来のエッジ法²⁾と比較して次のような特徴を持つ。1) 計測感度が2倍高い、2) 計測速度のダイナミックレンジが広い、3) レイリー散乱雑音成分が除去できる、などである。

3. 差分弁別法の感度と精度

本研究の差分弁別法の特徴としてSN比と計測精度の計算を行う。ここで、実験システムのパラメータをTable 1に示す。

Table1 System parameter

| | |
|----------------------|-------------------|
| 光源：シーダ付Nd:YAGパルスレーザー | |
| 波長λ | 355 nm / 532 nm |
| エネルギー | 30 mJ / 30 mJ |
| スペクトル線幅 | 100 MHz |
| 送受信系 | |
| 望遠鏡直径 | 20 cm |
| 送信光学系の透過率 | 0.5 |
| 受信光学系の透過率 | 0.1 |
| フィルター：FPエタロン | |
| スペクトル線幅 | 200 MHz / 180 MHz |
| FSR | 8.13 GHz / 5 GHz |
| 透過率 | 0.5 |
| 検出器：光電子増倍管 | |
| 量子効率 | 0.4 / 0.3 |

ただし、SN比を求める際、ライダー方程式³⁾における送受信光学系の視野の重なりを表す係数Y(R)は全体で0.3とし、後方散乱係数の体積後方散乱係数の高度分布として米国の標準大気モデル⁴⁾を用いた。

高度に対する光電子数分布をFig.3に、また、SN比及び速度測定の標準偏差をFig.4に示す。ここでは、距離分解能をΔL=150mとし、標準偏差には感度の最大値を用いた。

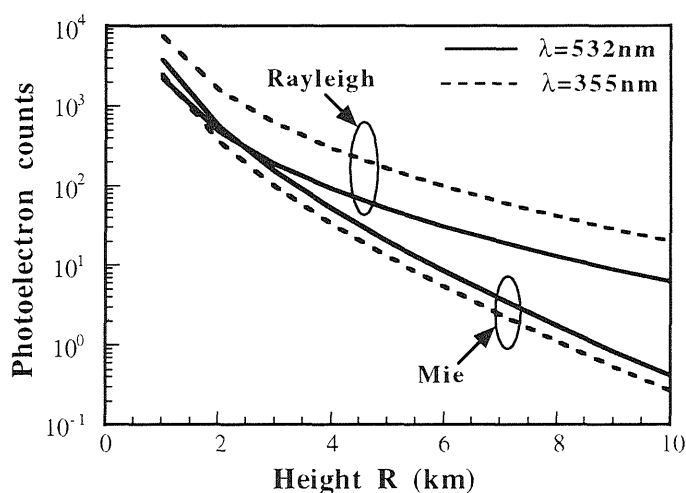


Fig. 3 Height profiles of photoelectron counts of Mie and Rayleigh scattering. (Range resolution : 150 m)

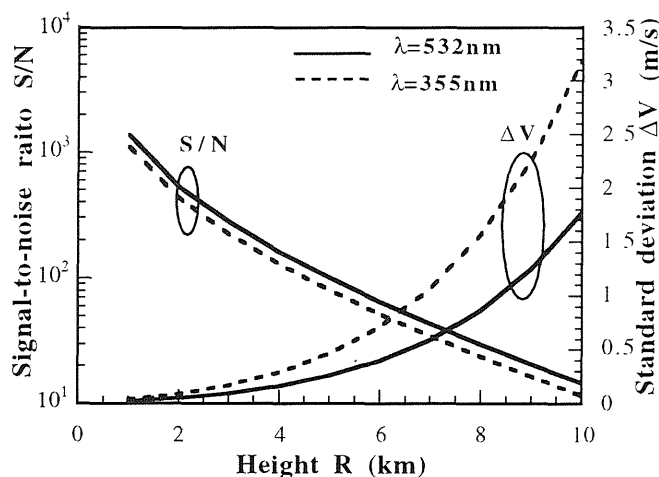


Fig. 4 Height profiles of signal-to-noise ratio and velocity standard deviation. (Shot average n : 1000)

4. UV域ドップラーライダーによる風速計測結果

Fig. 2に示したシステム構成のドップラーライダーを用いて風速の計測を行った。エタロンへの入射角により、フィルターの多チャンネル化を行った。また、スキャンミラーを用いることにより、風速と風向の計測が可能である。またUV域 ($\lambda=355\text{ nm}$) の波長を用いることにより、アイセーフライダーとなることが特徴である。

Fig. 6に風速の高度分布と風速のバラツキの計測結果を示す。この結果より、距離2.5kmで0.8m/sの標準偏差で高度分布が得られた。

Fig. 4に示したように理論的には高度2.5 kmで、約0.15 m/sの標準偏差が得られることが期待されるため、さらにシステムの検討が必要である。

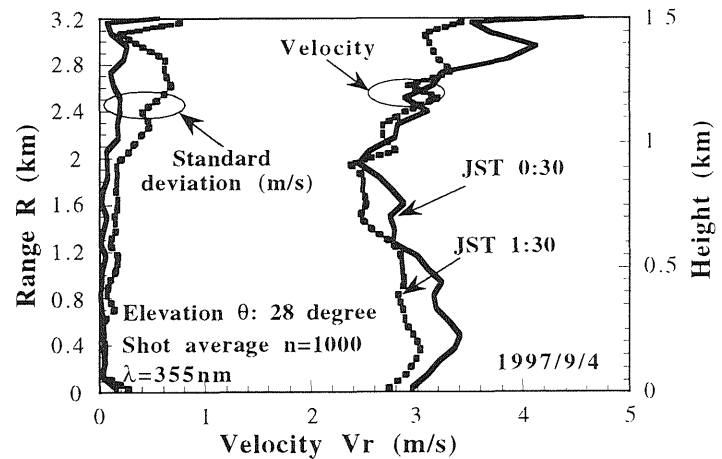


Fig. 6 Height profiles of wind velocity and standard deviation.

5. まとめ

エタロンによる差分弁別法を用いたUV域ドップラーライダーを開発した。従来のエッジ法に比べ、高精度で広いダイナミックレンジが得られることが特徴である。また、光源にUV域レーザーを用いることによりアイセーフとなる。今後の課題として、システムの改善を行いさらに高精度化を計りたい。

参考文献

- [1] 小林喬郎；”環境情報のレーザーリモートセンシング技術”，日本リモートセンシング学会誌, 5, pp. 1-5 (1985) .
- [2] C. Laurence Korb, Bruce M. Gentry, and Chi Y. Weng ; "Edge technique : Theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind ", Appl. Opt. Vol.31, pp. 4203-4209 (1992).
- [3] John A. Reagan, M. Patric McCormick and James D. Spinhirne ; "Lidar sensing of aerosols and clouds in the troposphere and stratosphere ", Proc. of the IEEE, Vol.77, pp. 435-438 (1989) .
- [4] 笹野泰弘、小林喬郎；”衛星搭載レーザーレーダーによる地球規模大気環境の評価に関する調査報告 (4)、最終報告書”，国立環境研究所資料, F-82-'95/NIES, pp. 30-34 (1995) .