

金属蒸気フィルターを用いたドップラーライダーによる風速測定法

柴田 泰邦*・長澤 親生*・阿保 真*・永井 智広**・内野 修***

*東京都立大学大学院工学研究科電気工学専攻 〒192-0397 八王子市南大沢 1-1

**気象庁気象研究所 〒305-0052 つくば市長峰 1-1

***気象庁 〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4

Study on Doppler Lidar Technique for Wind Measurements Using an Atomic Vapor Edge Filter

Yasukuni SHIBATA,* Chikao NAGASAWA,* Makoto ABO,* Tomohiro NAGAI** and Osamu UCHINO***

*Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University, 1-1, Minami-Ohsawa, Hachioji 192-0397

**Meteorological Research Institute, 1-1, Nagamine, Tsukuba 305-0052

***Meteorological Agency, 1-3-4, Ohtemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122

We propose an edge Doppler lidar by use of an atomic vapor. For the atomic vapor filter the frequency of edge is more stable against thermal drift than that of the etalon filter usually employed. The slope of the edge is relatively moderate when compared with that of the iodine-vapor edge filter. These features imply that the thermal control system of the edge filter can be simplified, leading to the improvement of the wind measurement accuracy. In this paper, the results of our simulation are described concerning the accuracy of wind measurement using a Doppler lidar with the atomic vapor edge filter. Considering a feasible lidar system, it is shown that the horizontal wind velocity can be measured with an accuracy of better than 1.5 m/s from ground to about 30 km altitude and better than 5 m/s from 30 km to about 50 km altitude, with a vertical resolution of 1 km.

1. はじめに

高高度までの風速分布観測は、気象予報や気候変動予測に重要な役割を期待されているが、現状では高度約 30 km までしか到達しない高層バルーンとロケット観測によって行われているのみである。将来における有力な風速測定法のひとつとして、レーザーライダー（ライダー）による風速測定法が考えられる。一般に、ライダーによる散乱波長のドップラーシフトを利用した風速測定法として、コヒーレント方式とインコヒーレント方式がある。コヒーレント方式¹⁾に比べ、インコヒーレント方式は装置が簡易なことから、最近この方式による風速測定法の研究が進展している²⁻⁶⁾。インコヒーレント方式の代表的なものとして、エタロンを用いて受信光のスペクトル偏移を直接測定する方

法^{2,3)}と、エタロンやヨウ素フィルターの透過率の傾き部分であるエッジ（肩）を利用して透過光強度の変動からドップラーシフトを測定するエッジ法⁴⁻⁶⁾がある。

Korbらによって最初に提案されたエッジ法^{4,5)}は、ドップラーシフトした受信光と送信レーザー光のフィルター透過光強度の比から風速を求めるものであった。しかし、フィルターにエタロンを用いたため、フィルター自身の温度のわずかな変化によりフィルターの透過周波数シフトが起こり測定精度を劣化させた。また、ミー散乱とレイリー散乱の存在する領域においては両者の混合比の違いによって散乱光の受信信号強度が変わるため、風速測定誤差が生じた。さらに、レイリー散乱スペクトルの卓越する高度では、測定時の上層大気温度によってレイリースペクトル幅が変動するため、風速測定誤差が大きくなった。この誤差を抑えるためにはエッジの傾きは緩やかなほうがよいが、ドッ

E-mail: shibata@eei.metro-u.ac.jp

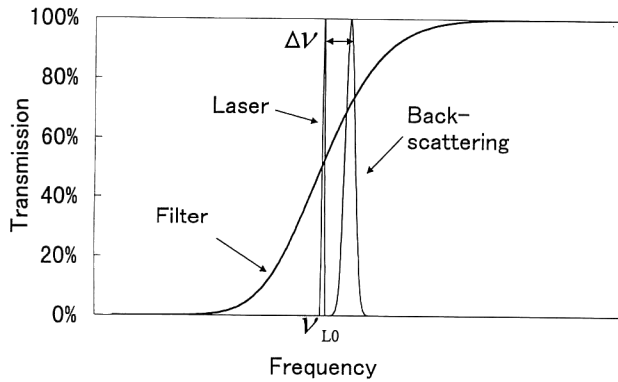


Fig. 1. Relation among the filter transmission, and the laser spectrum, and the Rayleigh back-scattering spectrum. (ν_{L0} : laser frequency, $\Delta\nu$: Doppler shift frequency by wind)

プラーシフトに対する透過光強度の変化が小さくなり、測定感が悪くなる。

最近、Freidmanらはエッジフィルターにヨウ素セルを用い、さらに受信光を2つに分けて直接得られる信号とフィルター透過信号の強度比から風速を求める方法を提案した⁶⁾。この方法を用いると、Korbらの方法で問題となったレーザー光と散乱光のスペクトル幅の違いによる測定誤差や、ミー散乱の影響による測定誤差を抑えることができる。Freidmanらは実際にヨウ素フィルターを用いて風速測定を行い、距離分解能1.5 kmで高度45 km付近までの測定に成功している⁶⁾。

本論文において、筆者らはエッジ法のフィルターに金属蒸気フィルター⁷⁾を用いることを提案する。金属蒸気フィルターは、フィルター自身の温度変化の影響を受けにくいいため、エタロンに比べフィルター温度制御の取り扱いが容易になる。また、Freidmanらが用いたヨウ素フィルターよりエッジの傾きが小さい金属蒸気フィルターを用いることで、レイリー散乱スペクトル幅の温度依存性による影響をさらに軽減できることを、コンピューターシミュレーションにより示す。

2. エッジ法による風速測定の原理

Fig. 1にフィルターの透過スペクトル、レーザー光スペクトル、および上層大気からの受信光スペクトルを模式的に示す。上層大気からの後方散乱光のスペクトルは、温度に依存して決まる大気分子の推進運動によるドップラー広がりをもつ。Fig. 2にFreidmanらが用いたエッジ法による風速測定ライダーシステムのブロック図を示す。受信光はビームスプリッターで2つに分けられ、検出器1 (Det. 1) で得られるフィルター透過光の信号強度 P_1 と検出器2 (Det. 2) で得られる信号強度 P_2 の比を R とすると次式で

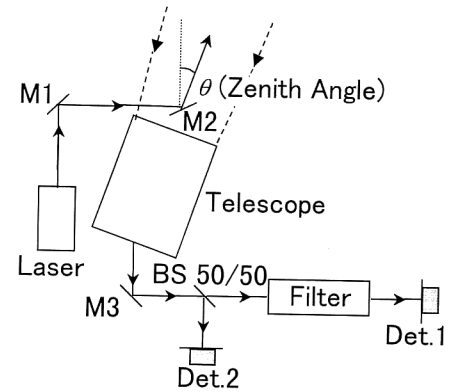


Fig. 2. Outline of the edge technique lidar system. (M: mirror, BS: beam splitter, Det.: detector)

表される⁴⁾。ここで、レーザーのスペクトル幅は十分狭いものとする。

$$R(\nu_{L0} + \Delta\nu) = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} S(\nu_{L0} + \Delta\nu - \nu') F_a(\nu') d\nu'}{P_2} \quad (1)$$

ここで、 ν_{L0} はレーザー周波数、 $\Delta\nu$ は風によるドップラーシフト周波数、 $S(\nu)$ は散乱光スペクトル、 $F_a(\nu)$ は金属蒸気フィルターの透過関数である。式(1)から R は $\Delta\nu$ の関数として与えられることがわかる。

この際、ライダーの送受信軸は水平方向の風速測定を行うために天頂角 θ だけ傾けられている。水平方向の風速 V は R の値から実験的に求まる $\Delta\nu$ を用いて以下の式から求まる⁴⁾。

$$V = \frac{\lambda_{L0} + \Delta\nu}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

ここで、 λ_{L0} はレーザー波長である。

ドップラーシフトした受信光スペクトルの中心がエッジからはみ出ないように、レーザー周波数 ν_{L0} はエッジの中心付近の周波数を選ぶ必要がある。また、 $\Delta\nu$ に対する信号強度比 R の変化量 ΔR を感度と定義すると、エッジの傾きの大きいほうが感度を上げることができ、測定精度が向上する。一方、エッジの傾きが大きすぎてエッジ部分に対し受信光のスペクトル幅が広がると、ドップラーシフトに対する信号強度変化が小さくなり、測定感が悪くなる。さらに、実際の測定では気温分布モデルを仮定して信号強度比 R と風速 V の関係を見積もるが、レイリー散乱スペクトル幅の温度依存性により受信信号強度が変化するため、モデルと実際の気温とのずれが測定誤差に加わる。

3. 金属蒸気フィルター

金属蒸気フィルターの透過関数は金属原子の温度や質量、セルの長さに依存する。金属蒸気フィルターの透過関数を以下に示す⁹⁾。

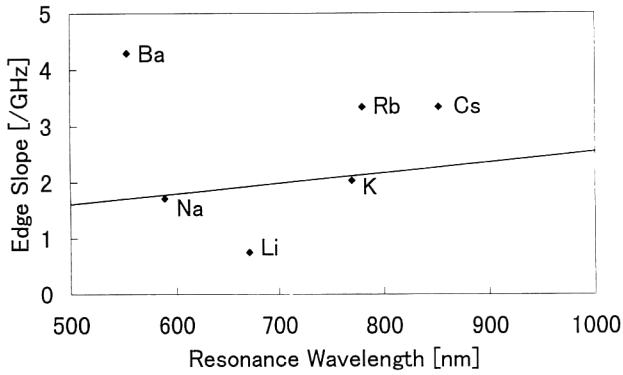


Fig. 3. The edge slope corresponding to the minimum error of the wind-speed measurement as a function of the resonance wavelength (solid line). The atmospheric temperature variation of $\pm 10^\circ\text{C}$ from the U.S. standard temperature profile is assumed. In addition the fluctuation of the detector ratio R of $\pm 10\%$ is postulated due to the drift of the filter temperature and the instability of the laser frequency. The actual wavelength and edge slope are indicated for six atomic vapor filters.

Table 1. Parameters of K, Na and I_2 filters.

	K	Na	I_2
Wavelength [nm]	769.99	589.0	532.26
Cell length [cm]	1.0	1.0	20.0
Cell temperature [K]	380	500	380

$$F_a(\nu) = \exp\left[-k_0 l \exp\left\{-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_b}\right)^2\right\}\right] \quad (3)$$

ただし,

$$\Delta\nu_b = \frac{2.1472 \times 10^{-5}}{\lambda_0} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad [\text{GHz}]$$

$$k_0 = \frac{2.4928 \times 10^{-11}}{\Delta\nu_b} N_a \xi$$

ここで, l はセル長 [cm], ν_0 は共鳴中心周波数 [GHz], λ_0 は共鳴中心波長 [cm], T は金属蒸気温度 [K], M は金属原子量 [amu], N_a は金属原子密度 [cm^{-3}], ξ は金属原子の振動子強度である.

レイリー散乱の卓越する高度 15 km 以上において, レイリー散乱スペクトル幅の気温依存性による影響を抑えるため, U.S. 標準大気モデル⁹⁾を用いて風速測定誤差が最小となる金属原子蒸気セルの検討を行った. 仮定した上層大気の気温分布から実際の気温が $\pm 10^\circ\text{C}$ ずれ, さらにフィルター温度のゆらぎとレーザー発振周波数の不安定性により, 受信信号強度比 R が $\pm 10\%$ 変化した場合の風速測定誤差への影響を計算した. フィルター透過率が周波数に対してほぼ直線状に変化する透過率 20~80% でのエッジの傾きを edge slope と呼ぶと, 風速測定誤差が最小となる共鳴波長と edge slope の関係は Fig. 3 の実線で示すことができ

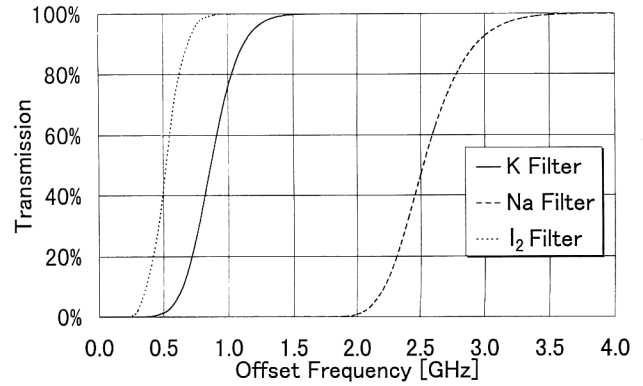


Fig. 4. Transmission of the K filter (cell length; 1 cm, filter temperature; 380 K), the Na filter (cell length; 1 cm, filter temperature; 500 K) and the I_2 filter (cell length; 20 cm, filter temperature; 380 K). Offset frequency indicates the deviation from the line center.

る. レイリー散乱スペクトル幅は波長に反比例しているので, 短い波長では受信光のスペクトル幅が広くなり, edge slope を小さくして感度 ΔR を下げなくてはならないことがわかる. Fig. 3 にはまた, Li, Na, K, Rb, Cs, Ba の各原子をエッジフィルターに用いた場合の各共鳴波長と, そのときの edge slope の位置^{9,10)}を示した. 風速測定誤差が最小となる実線に近い値をもつ金属原子として Na 原子 ($\lambda_0 = 589 \text{ nm}$) と K 原子 ($\lambda_0 = 770 \text{ nm}$) が挙げられる. Na の共鳴波長から色素レーザーを用いて風速測定が可能である. また K の共鳴波長は 770 nm なので, 色素レーザーより取り扱いが容易である Ti:sapphire レーザーの利用が可能である. 以下の章ではカリウムとナトリウムの蒸気フィルターを使ったエッジ法による風速測定の測定精度の検討を行う.

4. システム誤差の検討

エッジ法の測定誤差は, システム誤差と受信信号強度に起因するランダム誤差に分けられる. システム誤差としては, レーザー発振周波数のゆらぎ, フィルター温度のゆらぎ, レイリー散乱スペクトルの温度依存性による影響, ミー散乱とレイリー散乱の混合比による影響が考えられる. まず, この章ではシステム誤差の見積もりを行い, 次章でランダム誤差を含む風速測定誤差のシミュレーションを行う.

ライダーの傾きを天頂角 30° とし, Table 1 に示すフィルターのパラメーターと U.S. 標準大気モデルとラジオゾンデの風速データを用いてシステム誤差の検討を行った. 比較のため Freidman らが用いたヨウ素フィルターについても同様の検討を行った. ここで, ヨウ素の吸収係数はカリウム, ナトリウム原子の吸収係数に比べ小さいため, カ

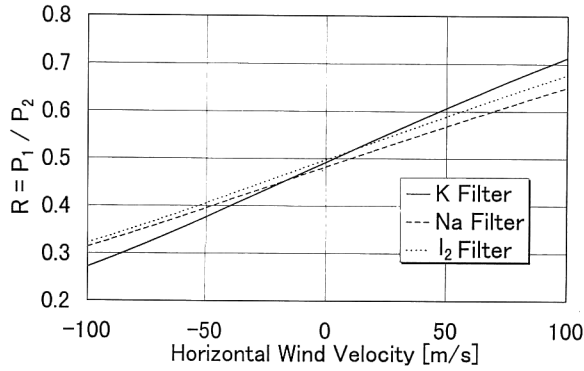


Fig. 5. Simulated $R (= P_1/P_2)$ value in the Rayleigh scattering region as a function of the horizontal wind velocity.

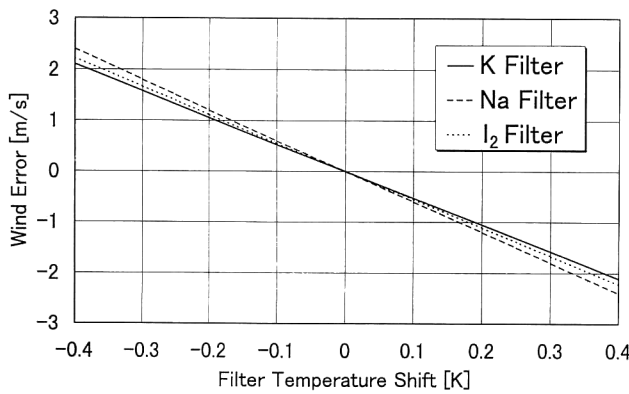


Fig. 6. Simulated wind error as a function of filter temperature shift.

リウム、ナトリウムと同等の吸収を得るためにセル長を 20 cm として計算を行った。Fig. 4 に式(3)から求めたカリウム、ナトリウム蒸気フィルターと以下の式^{11,12)}から求めた線番号 1109 のヨウ素フィルターの透過スペクトルを示す。

$$F_{I_2}(\nu) = \exp[-\Gamma_i g_i(\nu) l] \quad (4)$$

ただし

$$\begin{aligned} \Gamma_i &= \frac{8\pi^3}{3hc} f_i \left(\frac{g'}{g''} \right) \left(\frac{S_{J',J''}}{2J''+1} \right) \frac{N_{\nu',J''}}{g_{ns}} \\ &\quad \times |\mu_e(R)|^2 |\langle \nu''(J'') | \nu'(J') \rangle|^2 \\ g_i(\nu) &= \frac{2}{d\nu_i} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_i}{d\nu_i} \right)^2 \right] \\ d\nu_i &= \nu_i \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{M}} \end{aligned}$$

ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 ν_i は吸収周波数、 (g'/g'') は縮退比、 $S_{J',J''}$ は Hönl-London 回転線強度、 J は回転量子数、 $N_{\nu',J''}$ は分子密度、 g_{ns} は核スピン縮退、 $|\mu_e(R)|$ は平均遷移強度、 $|\langle \nu''(J'') | \nu'(J') \rangle|$ は Frank-Condon 因子、 k はボルツマン定数である。

Fig. 5 に U.S. 標準大気モデルを利用して散乱スペクト

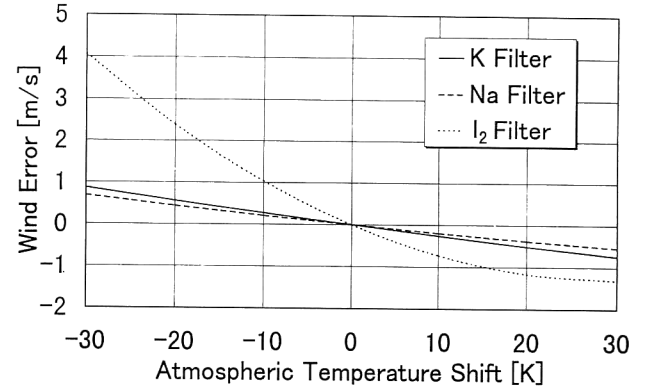


Fig. 7. Simulated wind error as a function of atmospheric temperature shift.

ルを計算し、レイリー散乱の卓越する高度領域での水平風速に対する R をカリウム、ナトリウム、ヨウ素についてそれぞれシミュレーションした結果を示す。Fig. 5 から R の値は水平風速 1 m/s 当たりカリウムで 0.22%、ナトリウムで 0.17%、ヨウ素は 0.18% 変化している。

4.1 レーザー周波数の不安定性による影響

エッジ法においてはレーザー周波数のゆらぎは見かけ上のドップラーシフトとなり、風速測定誤差に反映される。例えば、ライダーの傾きが天頂角 30° の場合、今まで述べた 3 つのエッジフィルターに用いるレーザーの発振周波数が 1 MHz ゆらぐと水平風速誤差に換算して 1 m/s 前後となり、誤差を抑えるためにはレーザー発振周波数のゆらぎを無視できない。そこで、レーザー光の一部を信号受信部に取り分け、フィルター透過光の信号強度 P_1 と Det. 2 で得られる信号強度 P_2 の比を 1 ショットごとに測定することで発振周波数のゆらぎを検出し、補正する必要がある。

4.2 フィルター温度のゆらぎによる影響

金属蒸気フィルターの透過スペクトルは式(3)から金属蒸気温度の変化によりその形、半値幅が変わるため、この温度のゆらぎによりフィルター透過強度 P_1 が変化し、測定精度に影響を与える。Fig. 6 にカリウム、ナトリウムの各蒸気フィルターとヨウ素フィルターの温度変化に対する水平風速誤差を示す。Fig. 6 の結果からカリウム、ナトリウム、ヨウ素のどのフィルターも温度を ± 0.1 K で制御することで水平風速誤差を約 ± 0.5 m/s とすることができる。しかしヨウ素の場合、吸収が弱い場合セル長は 20 cm と長くなり、このようなセルの温度を全長にわたって ± 0.1 K で制御することは難しい。これに対しカリウムやナトリウムのセル長は 1 cm と短く、温度制御がヨウ素セルを用いる場合より容易になる。

4.3 レイリースペクトル幅の気温依存性による影響

通常のエッジ法においては気温分布モデルを仮定する

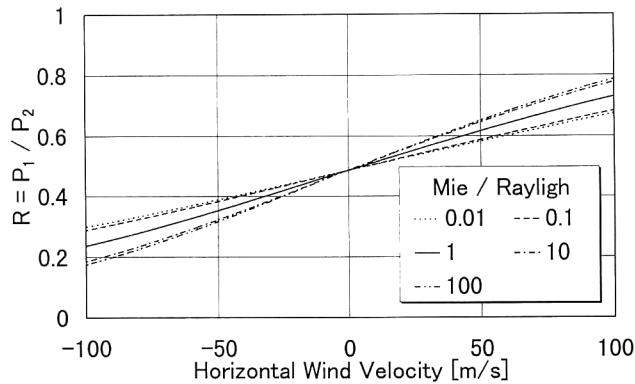


Fig. 8. Simulated R value as a function of horizontal wind velocity for various ratios of Mie scattering and Rayleigh scattering intensities at 5 km altitude using the K filter.

が、実際の上層大気温度は気温分布モデルとずれるためレイリー散乱スペクトル幅の温度依存性により受信信号強度が変化し、これが測定誤差要因となる。Fig. 7 に気温分布モデルからの気温変化に対する水平風速誤差を示す。Fig. 7 の結果からヨウ素フィルターを用いた場合、カリウム、ナトリウム蒸気フィルターを用いた場合に比べ気温変化に対する水平風速誤差が大きい。これは、カリウムに比べヨウ素の共鳴波長が短いため散乱光スペクトルが広がっていることと、ヨウ素フィルターのエッジの傾きがカリウム、ナトリウム蒸気フィルターに比べ大きい (Fig. 5 参照) ため、レイリー散乱スペクトル幅の変化に対し信号強度比 R がカリウム、ナトリウム蒸気フィルターを用いた場合に比べ大きく変化するためである。

1992 年の館野におけるラジオゾンデの気温分布データを見ると、高度 10 km における年間気温の標準偏差は約 10°C である。このことから、カリウム、ナトリウム蒸気フィルターを用いた場合、年平均気温分布を仮定するとレイリー散乱スペクトル幅の気温依存性による水平風速誤差を約 $\pm 0.3 \text{ m/s}$ にすることができる。ヨウ素フィルターを用いた場合、水平風速誤差は約 $\pm 1.0 \text{ m/s}$ となる。したがって、上の場合と同程度の水平風速精度を得るためには、約 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ の範囲で気温分布を仮定しなければならず、実測の気温分布による補正が必要となる。

4.4 ミー散乱による影響

散乱光に含まれるミー散乱が無視できない高度領域において、ミー散乱光強度によって R の値が変わる。カリウム蒸気フィルターを用いた場合の一例として、高度 5 km においてミー散乱光とレイリー散乱光の強度比を 0.1, 1.0, 10, 100 としたときの水平風速に対する R の値を Fig. 8 に示す。風速が大きくなるとエッジの傾きが非線形となる領

Table 2. Lidar system parameters used in the simulation of wind measurements.

	K	Na	I ₂
Wavelength [nm]	769.99	589.0	532.26
Pulse energy [mJ]	500	500	500
Shot number	36000	36000	36000
Telescope diameter [cm]	100	100	100
Range resolution [m]	1000	1000	1000
Laser FWHM [MHz]	100	100	100
Quantum efficiency of PMT [%]	10	15	15
Zenith angle [deg.]	30	30	30

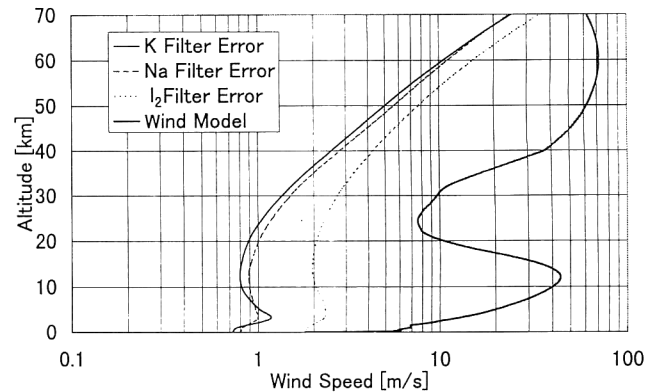


Fig. 9. Wind model and the resulting total error of the wind speed. The filter temperature shift of $\pm 0.1 \text{ K}$ and the atmospheric temperature shift of $\pm 10^{\circ}\text{C}$ are assumed for the error calculation.

域 (フィルター透過率 $\sim 20\%$, $80\% \sim$) に散乱光スペクトルがかかるため、 R に変化が起こると考えられる。この影響は、Det. 2 で得られる散乱光信号強度 P_2 からミー散乱光とレイリー散乱光の強度比を求めることで補正可能である。

5. ライダー測定シミュレーション

最後に、Table 2 のシステムパラメーターを用いカリウム、ナトリウム、ヨウ素の各フィルターを用いた場合のすべてのシステム誤差とランダム誤差を考慮した水平風速誤差と、ラジオゾンデの風速データと中間圏の風速分布¹³⁾をもとに仮定した風速分布モデルを Fig. 9 に示す。気温分布モデルはラジオゾンデと U.S. 標準大気モデルを用い、年平均気温分布から $\pm 10^{\circ}\text{C}$ の変動を仮定した。また、フィルターの温度を $\pm 0.1 \text{ K}$ で制御し、レーザー発振周波数の補正がなされ、ミー散乱とレイリー散乱の混合比が $\pm 5\%$ 以内の精度で補正できているものとした。さらに、夜間の測定を想定して背景光雑音は無視している。

Fig. 9 の結果からカリウム、ナトリウム蒸気フィルターを用いた場合、高度 30 km 付近まで水平風速誤差 1.5 m/s 以下で、高度 50 km 付近まで水平風速誤差 5.0 m/s 以下

で測定できることがわかる。ナトリウムの測定精度がカリウムに比べ若干悪いのは、ナトリウムの感度 ΔR がカリウムの感度 ΔR より悪い (Fig. 5 参照) ためである。ヨウ素フィルターを用いる場合は、カリウムやナトリウム蒸気フィルターを用いた場合と同程度の測定精度を得るには、実測の気温分布を用いてレイリー散乱スペクトル幅の温度依存性の影響を校正しなければならない。また、高度 4 km 付近で測定誤差が大きくなっているが、仮定した大気モデルにおいてミー散乱とレイリー散乱の強度比がほぼ 1:1 になる高度であり、ミー散乱のわずかな変化が受信信号強度に影響を与えているためと考えられる。

6. 結 論

筆者らはドップラーライダーのエッジ法のフィルターにカリウムとナトリウムの金属蒸気フィルターを用いて、風測定を行う方法を提案した。システム誤差を検討した結果、レーザー発進周波数のゆらぎは、信号受信部において取り分けたレーザー発振長のフィルター透過信号と直接得られる信号の比から補正が可能である。フィルター温度のゆらぎによる影響は、カリウム、ナトリウム蒸気を ± 0.1 K 以下で制御することにより水平風速誤差約 0.5 m/s 以下で測定することができる。また、金属蒸気フィルターはエタロンに比べて温度変化に対し安定しているため扱いやすく、ヨウ素に比べセル長を短くできるのでフィルター温度を制御しやすい利点がある。測定大気の気温変化によるレイリースペクトルの変化に起因する誤差は、ヨウ素フィルターを用いたエッジ法では実測の気温分布で校正する必要があるが、カリウム、ナトリウム蒸気フィルターを用いた場合、年平均の気温分布モデルを仮定すれば水平風速誤差を 0.3 m/s 以下に抑えることができる。以上から、カリウム、ナトリウム蒸気フィルターを用いたエッジ法のシステム誤差は約 0.8 m/s 以下に抑えられることがわかった。

ミー散乱とレイリー散乱が混在する高度領域では、同じ風速でも混合比の違いによって受信信号強度比 R が変わる。このため混合比を測定し、この影響を補正する必要がある。特に混合比が 1:1 となる高度において、混合比の測定精度が風速測定精度に大きく影響する。

Table 2 のシステムパラメーターを用いたときのランダム誤差とシステム誤差を考慮した結果、カリウム、ナトリウム蒸気フィルターを用いると、ライダーの傾きが天頂角 30° で地上から 30 km 付近まで水平風速誤差 1.5 m/s 以

下、高度 50 km 付近まで水平風速誤差 5 m/s 以下とほぼ同程度の精度で測定できることがわかった。

カリウムの吸収波長 770 nm 付近には波長同調可能なパルスレーザーとして Ti:sapphire レーザーがあり、ナトリウムの吸収波長は色素レーザーの利用が可能である。Table 2 に示すライダーシステムを用い、繰り返し 20 Hz で風速測定を行えば、30 分の観測時間で Fig. 9 の誤差で観測されることになる。

文 献

- 1) R. T. Menzies and R. M. Hardsy: "Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields," Proc. IEEE, **77** (1989) 449-462.
- 2) C. A. Tepley, S. I. Sargoytchev and R. Rojas: "The Doppler Rayleigh lidar system at Arecibo," Proc. IEEE, **31** (1993) 36-47.
- 3) M. L. Chanin, A. Garnier, A. Hauchecome and J. Porteneuve: "A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere," Geophys. Res. Lett., **16** (1989) 1273-1276.
- 4) C. L. Korb, B. M. Gentry and C. Y. Weng: "Edge technique: Theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind," Appl. Opt., **31** (1992) 4202-4213.
- 5) B. M. Gentry and C. L. Korb: "Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry," Appl. Opt., **33** (1994) 5770-5777.
- 6) J. S. Freidman, C. A. Tepley, P. A. Castleberg and H. Roe: "Middle-atmospheric Doppler lidar using an iodine-vapor edge filter," Opt. Lett., **22** (1997) 1648-1650.
- 7) 長澤親生, 阿保 真, 野口和夫: "ライダー用金属蒸気フィルターの試作と性能評価", 第 21 回リモートセンシングシンポジウム講演論文集 (1995) pp. 29-30.
- 8) "U.S. Standard Atmosphere," U.S. Government Printing Office (1976).
- 9) 大道寺英弘, 中原武利: 原子スペクトル 測定とその応用 (学術出版センター, 1988) pp. 30-33.
- 10) R. J. Alvarez II, L. M. Caldwell, Y. H. Li, D. A. Krueger and C. Y. She: "High-spectral resolution lidar measurement of troposphere backscatter ratio using barium atomic blocking filters," J. Atmos. Oceanic Technol., **7** (1990) 876-881.
- 11) J. N. Forkey, W. R. Lempert and R. B. Miles: "Corrected and calibrated I_2 absorption model at frequency-doubled Nd:YAG laser wavelengths," Appl. Opt., **36** (1997) 6729-6738.
- 12) S. Gerstenkorn and P. Luc: "Description of the absorption spectrum of iodine recorded by means of Fourier transform spectroscopy: the (B-X) system," J. Phys., **46** (1985) 867-881.
- 13) 朝倉 正, 関口理郎, 新田 尚: 新版 気象ハンドブック (朝倉書店, 1995) pp. 15-16.