

# 気温観測用 HSRL に用いるカリウムファラデーフィルタの最適設計

菅原 悠真, 阿保 真

首都大学東京 システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

## Optimal design of K Faraday filter for atmospheric temperature measurements with HSRL technique

Yuma SUGAWARA and Makoto ABO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: A high-spectral-resolution lidar (HSRL) using a potassium Faraday filter was proposed for temperature profile measurements in daytime. The Faraday filter acts as a blocking filter for suppression of narrow Mie scattering, and a very narrow filter for getting temperature information from Rayleigh-Brillouin spectrum. Mie scattering leak causes large temperature error. Therefore we design K Faraday filter in consideration of Mie scattering transmittance. We propose an optimal combination of filter parameters so as to minimize the temperature error.

Key Words: temperature, high-spectral-resolution lidar, Faraday filter

### 1 はじめに

気温の高度分布情報は、気象予報モデルの基礎データとして重要であるとともに、近年は竜巻、ゲリラ豪雨など局地的災害予測を行う上でも必要性が高まっている。現在用いられているラジオゾンデは測定場所に制限があり連続測定が困難であるため、高度分布の連続測定が可能なライダーによる気温測定手法の確立が求められている。

特に下部対流圏の気温高度分布観測用ライダーとしては、雲やエアロゾルからの散乱による影響を十分除去する必要がある。昼間の観測が必須である。我々は金属蒸気吸収フィルタを用いた高スペクトル分解能ライダー (HSRL) <sup>1)</sup>を改良し、昼間観測のために背景光除去効果のあるファラデーフィルタを使用したシステムを提案している <sup>2)</sup>。

本研究では、地表面付近から気温変動の大きい高度 2km までの気温を、日中においても高精度に計測することのできる HSRL の実現を目標とし、カリウムファラデーフィルタを用いた HSRL の実用化に向け、ミー散乱が気温測定誤差に与える影響について検討し、統計誤差や磁場誤差も考慮した上で、測定誤差が最小となる最適なフィルタ組合せを提案する。

### 2 HSRL による気温測定原理

HSRL による気温の測定原理は、大気温度並び衝突により変化する大気分子からのレイリーブリルアン (RB) 散乱光スペクトル拡がり <sup>4)</sup>を、帯域幅の異なる 2 つの狭帯域フィルタを用いて測定し、透過光の強度比の温度依存性から大気温度を求める。

ファラデーフィルタ <sup>3)</sup>は金属蒸気フィルタに磁場をかけ、前後に偏光子を直交して置く構造となっており、磁場、セル温度、セルの長さの組合せにより、急峻な特性を得られることができる。また、帯域外遮断特性であるため昼間の背景光除去効果があり昼間の気温観測に適している。

HSRL における気温  $T_A$  における気温測定の統計誤差  $\varepsilon_T(T_A)$  は、信号の統計誤差  $\varepsilon_S$  と 2 つのフィルタの透過量比  $R(T_A)$ 、気温に対する透過量比の変化率

$\Delta R(T_A)/\Delta T_A$  により、次式で求められる。

$$\varepsilon_T(T_A) = \varepsilon_S R(T_A) \frac{\Delta T_A}{\Delta R(T_A)} \quad (1)$$

ここで、2 つのフィルタの透過量比  $R$  は、フィルタ #1, #2 の RB 散乱スペクトル透過量  $Q_1, Q_2$  により、次式で求められる。ただし、 $Q_1 < Q_2$  とする。

$$R = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (2)$$

なお信号の統計誤差  $\varepsilon_S$  は 2 つのフィルタの信号強度で決まり、背景光を無視すると各フィルタの透過量の逆数の 2 乗平均に比例する。

### 3 ファラデーフィルタの最適設計法

今回装置の小型を念頭に 2 つのファラデーフィルタは同じ温度とし、磁場を切り替える 1 フィルタ方式とする。最適設計のためには、ミー散乱遮断率を考慮しつつ、統計誤差と磁場誤差をそれぞれ最小とすればよい。RB 散乱のモデルとして、Tenti らが提案した S6 モデル <sup>4)</sup>を用いている。

#### 3.1 ミー散乱成分混入の影響

ミー散乱のスペクトル幅をレーザ線幅と等しいとして 100MHz とし、このスペクトルのフィルタ透過量をミー散乱透過量とする。セル温度 100°C と 110°C の磁場に対するミー散乱透過量を Fig.1 に示す。ミー散乱透過量は磁場に対して増加し、温度に対して減少する特性がある。ミー散乱成分が RB 透過量に混入したときの透過量比  $R'$  は次式で表せる。

$$R' = \frac{Q_1 + M_1}{Q_2 + M_2} \quad (3)$$

ここで、 $M_1, M_2$  はミー散乱透過量である。ミー散乱の透過量が増えると  $R$  が  $R'$  に変わり気温測定誤差が生じる。散乱比を 10 とし、ミー散乱透過量を  $10^{-6}$  以下にすることで気温測定誤差は 0.05K 以下になることがシミュレーションにより分かった。この条件でファラデーフィルタのセル温度毎の磁場の上限を決定した。

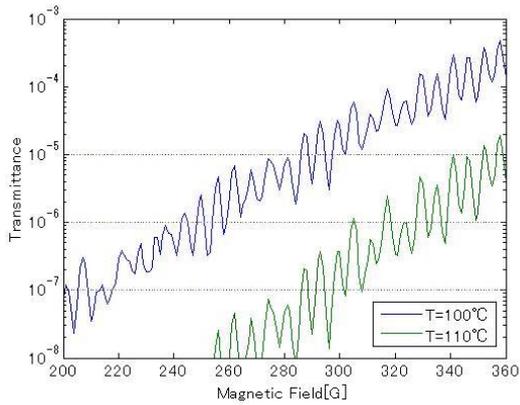


Fig. 1 Transmittance of Mie scattering component as a function of magnetic field of a filter. (Cell temperature:100°C and 110°C)

### 3. 2 統計誤差の最小化

式(1)の気温測定の統計誤差は、透過量比感度  $\Delta R/R$  と  $\epsilon_S$  の積で決まる。透過量パラメータを用いて変形した(4)式を評価関数  $E$  として、 $E$  が最小となる組合せが統計誤差最小となる。

$$E = \frac{1 + \frac{4Q_2}{Q_2}}{\frac{4Q_1}{Q_1} - \frac{4Q_2}{Q_2}} \sqrt{\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2}} \quad (4)$$

$\Delta R/R$  を小さくするためには、2つのフィルタの透過量変化率  $\Delta Q/Q$  の差を大きくすると良い。 $\Delta Q/Q$  は Fig.2 のような特性を持つ。そこで、各セル温度に対して、一つのフィルタは  $\Delta Q/Q$  が最大となる磁場とし、もう一つのフィルタの磁場を評価関数が最小になる組合せを求めると、最適な組合せは、セル温度 108°C、磁場 52G と 290G となった。

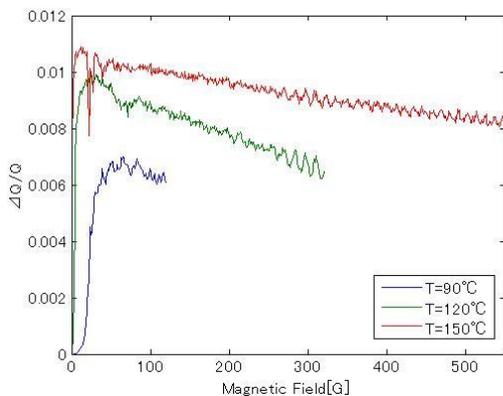


Fig. 2 Filter sensitivity as a function of magnetic field of a filter. (Cell temperature:90°C,120°C and 150°C)

### 3. 3 磁場誤差の最小化

フィルタの磁場変動による誤差は大きい  $\pm 1G$  程度の範囲で最適点が存在する。290G 付近のフィルタの RB 透過量を Fig.3 に示す。磁場に対する透過量の変曲点が磁場に対して安定しているため、289.1G が磁場誤差が最小となる。Table.1 で示した仕様のライダーシステムでの気温に誤差に換算した統計誤差と磁場変動を  $\pm 0.02\%$  としたときの磁場誤差を Fig.4 に示す。統計誤差の変化に比べて磁場誤差の変化の方が大きいことがわかる。

以上を総合し、最適仕様としてセル温度 108°C、磁場 52.7G と 289.1G の組合せが求められた。この時

ミー散乱による誤差 0.03K、統計誤差 0.57K、磁場誤差 0.03K となり高度 2km の Total 気温誤差は 0.63K となる。

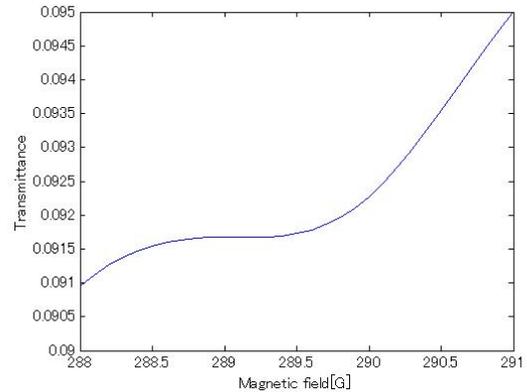


Fig. 3 Rayleigh-Brillouin scattering transmittance as a function of magnetic field of a filter. (Cell temperature:108°C)

Table 1. Lidar parameters for temperature error simulation

Pulse Energy	1mJ
Pulse Repetition Rate	10kHz
Wavelength	770.108nm
Telescope Aperture	20cm
Range Resolution	200m
Average Time	10min

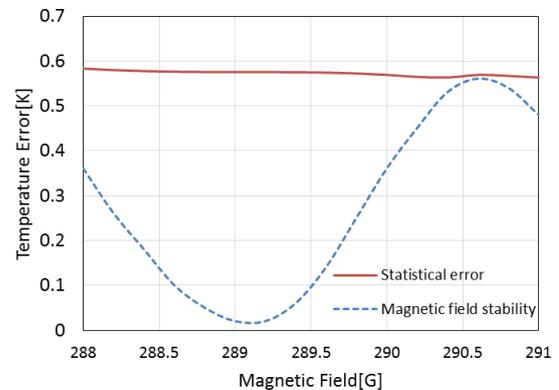


Fig. 4 Statistical error and magnetic field stability error as a function of magnetic field of the filter #2. (Cell temperature: 108°C, magnetic field of the filter #1: 52.7G)

## 4 おわりに

ミー散乱成分混入の影響を考慮した上で、気温測定誤差が最小となる最適組合せをシミュレーションにより決定した。今後はカリウムファラデーフィルタを用いた気温計測を行い誤差の評価を行う。

### 参考文献

- 1) H.Shimizu et al., Appl. Opt. 22 (1983) 1373.
- 2) 有賀他, 第 33 回レーザーセンシングシンポジウム, No. P-5, 2015.
- 3) Zhang et al., IEEE J. Quant. Elec. 37 (2001) 372.
- 4) G.Tenti et al., Can. J. Phys. 52 (1974) 285.