

# 回転ラマン散乱ライダーによる気温計測の安定化の検討

Stabilization of Temperature Measurement with Rotational Raman Lidar

塚本誠<sup>1</sup>、菅田高行<sup>1</sup>、長谷川壽一<sup>1</sup>、柴田泰邦<sup>2</sup>、長澤親生<sup>2</sup>、阿保真<sup>2</sup>

M. Tsukamoto<sup>1</sup>, T. Honda<sup>1</sup>, T. Hasegawa<sup>1</sup>, Y. Shibata<sup>2</sup>, C. Nagasawa<sup>2</sup>, M. Abo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>英弘精機株式会社 EKO Instruments. Co., Ltd, <sup>2</sup>首都大学東京 Tokyo Metropolitan University

**Abstract :** We have been developing a lidar system for measuring atmospheric temperature using the Rotation Raman scattering. In this paper, we report results of estimation of measuring errors caused by laser wavelength drift and by other optical components. These errors are comparable with results of temperature measurement by the lidar system.

## 1. はじめに

当社では、気象予報、環境アセスメント等への適用を目的として、回転ラマン散乱を利用した上空の気温を計測する気温計測用ライダーの開発を進めている<sup>1)</sup>。このライダーで計測した気温は、ラジオゾンデを使って計測した気温とは高度 3 km でまでで比較的良好一致しているが、目標とする 1K 以下の温度で安定に一致させることはできていない<sup>2)</sup>。

今回の報告では、気温測定誤差の発生原因をレーザーの波長変動、光部品の変動による特性変動の観点から検討した結果を報告する。

## 2. ライダーシステム

気温計測ライダーの構成を Fig.1 に示す。また窒素、酸素による回転ラマン散乱の 300K でのスペ

クトル強度とその温度係数を Fig.2 に示す。レーザー波長は 354.7nm としている。またライダー構成部品の諸元を Table1 に示す。Fig.1 で、望遠鏡で受光したラマン散乱光は回折格子と干渉フィルターを使って分光する。温度係数が負であるラマン散乱光は干渉フィルター1を透過してPMT1で受光する。このときの受光強度をP<sub>1</sub>とする。温度係数が正であるラマン散乱光はミラー5で反射された後、干渉フィルター2を透過し、PMT2で受光する。このときの受光強度をP<sub>2</sub>とする。気温応答関数S(z) (z: 高度)を以下のように定義する。

$$S(z) = P_2(z)/P_1(z) \tag{1}$$

気温は気温応答関数を使って以下のように近似できる。

$$T(z) = A \cdot S(z) + B \tag{2}$$

気温応答関数S(z)を高度zの関数として計測すれば各高度zでの気温を算出できる。

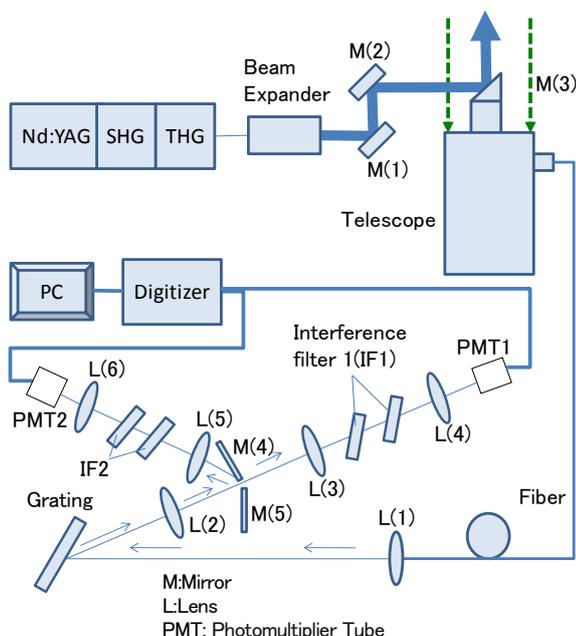


Fig.1 Rotational Raman lidar system.

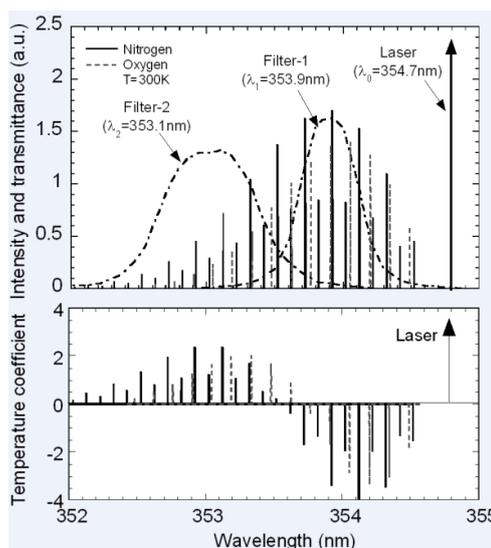


Fig.2 Rotational Raman spectrum and temperature coefficients of O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> molecules.

## 3. 気温測定誤差の検討

### (1) レーザー波長の変動

レーザーの波長が $\Delta\lambda$ だけ変化すると、ラマン散乱光の波長も $\Delta\lambda$ 変化する。このとき Fig.1 で干渉フィルター1、2 を透過する散乱光強度が変化し、気温応答関数  $S(z)$ が変化し、気温が変化したように見える。

Fig.2 の散乱光スペクトル強度と干渉フィルター1、2 の透過特性を使って、散乱光波長が  $\Delta\lambda$  だけ変化したときの気温 300K での気温応答関数  $S(z)$ の変化 $\Delta S(z)$ を計算すると以下ようになる。

$$\Delta S(z) / S(z) / \Delta\lambda = -1.8 \times 10^{-3} / \text{pm} \quad (3)$$

これと(2)を使って

$$\Delta T(z) / \Delta\lambda = -1.8 \times 10^{-3} \cdot A \cdot S(z) \quad (4)$$

Fig.3 はライダーで計測した気温応答関数  $S(z)$ とラジオゾンデで計測した気温を比較した結果である。この結果から  $A = 133\text{K}$ であり、300K 付近では  $S(z) = 0.6$  である。従って(4)は

$$\Delta T(z) / \Delta\lambda = -0.14 \text{ K/pm} \quad (5)$$

実際にレーザーの波長変動を2日間に亘って確認した結果では 3pmの変動があり、気温測定誤差として 0.4K を生じる。

## (2) 干渉フィルターの透過中心波長の変化

干渉フィルターの温度が変化すると、透過中心波長が変化する。Barr 社のカタログによれば温度係数は  $4 \times 10^{-8} / \text{K}$  であり、355nm では 1.4pm/K である。中心波長が変化することは、レーザー波長が変化するのと等価であり、干渉フィルターの温度変化 $\Delta T_i$ による気温測定誤差 $\Delta T$ は以下ようになる。

$$\Delta T / \Delta T_i = -0.20 \quad (6)$$

Fig.3 の気温計測中の干渉フィルターの温度変動は  $\Delta T_i = 2.5\text{K}$  であり、0.5Kの気温計測誤差を生じる。

## (3) 回折格子の回折角の変化

回折格子の温度が変化すると、回折格子の基板長さが変化し 1mm 当りのスリット本数が変化する。この結果、回折角が変化し、干渉フィルターに入るラマン散乱光の中心波長が変化する。このときもレーザーの波長が変化することと等価である。Fig.1 で回折格子経の入射角は入射角は  $16^\circ$  で、散乱光の中心波長変化は 2.5pm/K と計算される。この結果、回折格子の温度変化 $\Delta T_g$ による気温測定誤差 $\Delta T(z)$ は以下ようになる。

$$\Delta T(z) / \Delta T_g = -0.35 \quad (7)$$

Fig.3 の計測中の回折格子の温度は 2.5K であり、0.9K の気温計測誤差を生じる。

## 4. まとめ

回転ラマン散乱ライダーによる気温計測で、気温測定誤差が生じる原因をレーザー波長等の変動など

Table1 Specification of the lidar system.

Transmitter	
Laser	Nd:YAG
Wavelength	355nm
Pulse energy	<300mJ
Pulse width	<7ns
Repetition	20Hz
Divergence	0.09mrad
Receiver	
Telescope Diameter	400mm
Field of view	0.22mrad
Filter(1)	CWL=353.9 FWHM=0.4nm
Filter(2)	CWL=353.1 FWHM=1.0nm
Detector	PMT (R9880U-110)
Range resolution	150m

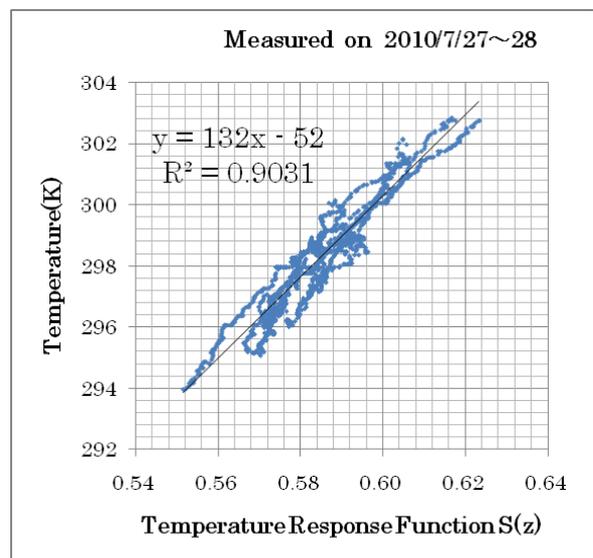


Fig.3 Scattergram of temperature response function and temperature measured by radiosonde temperature.

の観点から検討した。これらによる測定誤差は実際の誤差と同程度になっている。今後、レーザー波長の安定化を図り、また回折格子を使わずに干渉フィルターだけで分光するといった対策を行って、気温測定精度を向上させる予定である。

## 参考文献

- 1) 内田清孝他：回転ラマン散乱法を用いた気温ライダーとラジオゾンデとの比較結果, 第24回レーザーセンシングシンポジウム予稿集,P-6(2005)
- 2) 塚本 誠他：回転ラマン散乱を利用したライダーによる気温計測, 第26回レーザーセンシングシンポジウム予稿集,PG-36(2009)