

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 Comparison Result Between Rotational Raman Lidar and Radiosonde Observation

内田清孝^{*1}, 華灯鑫^{*1}, 加藤正^{*1}, 誉田高行^{*1}, 平下幸浩^{*1}, 小林喬郎^{*2}
Kiyotaka Uchida^{*1}, Dengxin Hua^{*1}, Tadashi Kato^{*1}, Takayuki Honda^{*1}, Yukihiko Hirashita^{*1}, and Takao Kobayashi^{*2}
^{*1}:英弘精機株式会社 EKO Instruments Co., Ltd., ^{*2}:福井大学 University of Fukui

Abstract:

Eko Instruments Co., Ltd, has developed a lidar system since 2001 with University of Fukui as a joint research. The lidar system is named "EKO Multi Purpose LIDAR System" for measuring temperature, humidity, and aerosol profiles up to 5km simultaneously. The system is in sales for the Japanese market since 2005. Applications of the temperature lidar cover a monitoring of heat island phenomenon, an environmental assessment for industry, and so on.

In these applied field, a radiosonde is widely used, however, it has several problems, i.e. effect of wind, measurement time, aviation and radio wave control, and so on. Compared with radiosonde, the lidar is a real time and effective measurement with easy operations.

In this report, comparisons between a temperature lidar, which is based on rotational Raman scattering, and radiosonde were carried out at Shibuya-ku, Tokyo in February, 2005. As the results, the lidar can measure temperature profile up to 1,000m in day and night, and averaged RMS error for ten data set between radiosonde and lidar was 1.2K.

1. はじめに

英弘精機株式会社は、2001 年以降、福井大学工学部との共同研究により気温ライダーの開発を行っており、2003 年に 1 号機となるプロトタイプ、2004 年に 2 号機となるエンジニアリングモデルの開発を行った。これらは、レイリー散乱法を用いた気温測定、振動ラマン散乱法を用いた水蒸気密度(相対湿度)測定およびミー散乱法を用いたエアロゾルによる大気散乱比、消散係数およびライダー比などの測定を実現している。

これとは別に、回転ラマン散乱法を利用した気温ライダーの研究開発も進めており、低価格で市場に提供できる気温ライダーの完成を目指している。当報告では、回転ラマン散乱法を利用した気温ライダーの安定性を検証し、ラジオゾンデによる気温データとの比較を通じた実用性の検証を行った。

2. 使用したライダーシステム

使用したライダーは、内田ほか(2004)や華ほか(2003,2004)に詳述されたライダーシステムの送受信系を使用しているが、回転ラマン散乱用分光計は福井大学工学部で試作された受信系を使用している。

(1)ハードウェア仕様

当ライダーのシステム構成図を Fig. 1, 光学配置を Fig. 2, 紫外域レーザに対する回転ラマン散乱分布と使用したフィルタ透過率を Fig. 3, 仕様一覧を Tab. 1 に示した。

Nd:YAG レーザの 3 倍波を使用した中心波長 355nm, 繰り返し 20Hz の紫外域レーザは、望遠鏡の副鏡直上から上空に射出される。上空からの後方散乱光は口径 25cm の望遠鏡で集光された後、分光計にて必要な信号が取り出され、デジタルオシロスコープにより記録される。取得したデータはパソコンで処理される (Fig. 1 参照)。

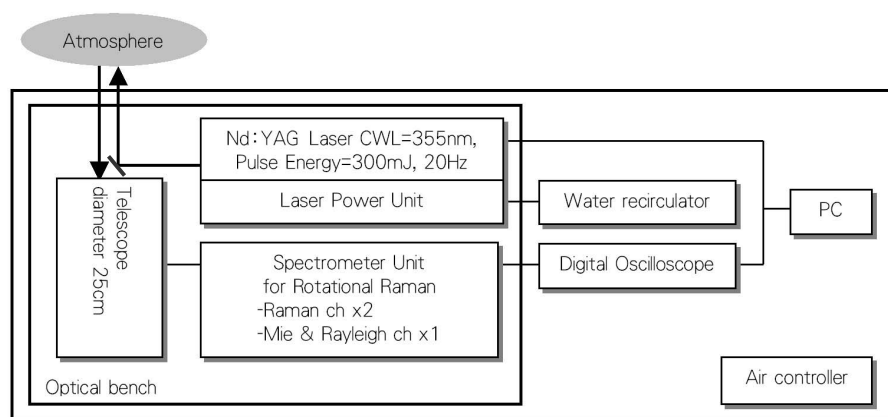


Fig. 1. Block diagram of the lidar system.

望遠鏡で集光された上空からの後方散乱光はファイバにより分光計に導かれる。回折格子(Grating)で反射した光は、エッジミラー(Edge mirror)による反射の後に干渉フィルタ(IF-1, IF-2)により分光され、回転ラマン散乱光を二つの光電子増倍管(PMT-1, PMT-2)で計測する。また、エッジミラー(Edge mirror)を透過したミー散乱とレイリ散乱からなる後方散乱光は光電子増倍管(PMT-3)により計測される。三つの光電子増倍管の出力から上空の気温分布とエアロゾル分布を計測することができる(Fig. 2 参照)。

気温 300K における窒素分子および酸素分子の純回転ラマン散乱断面および温度係数に加えて、当ライダーで使用している二つの干渉フィルタの相対分光透過率を Fig. 3 に示した。二つのフィルタは温度係数が逆転する波長位置とすることで気温感度を高めている。

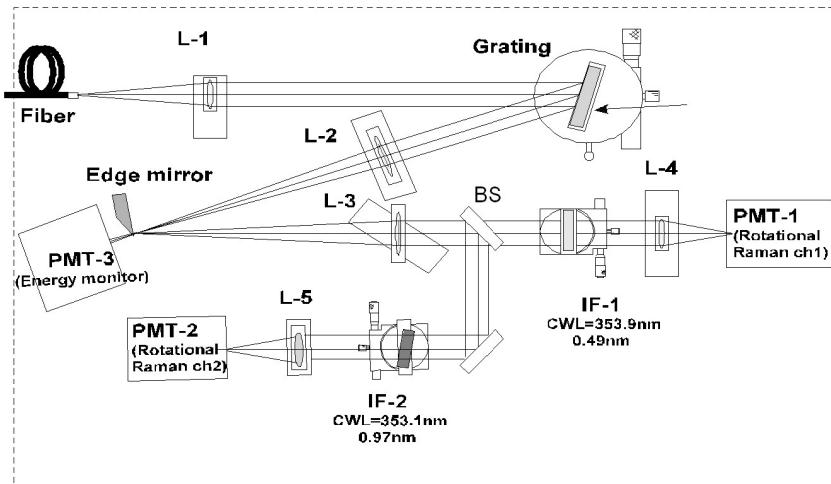


Fig. 2. Optical design of the rotational Raman lidar for temperature measurement.

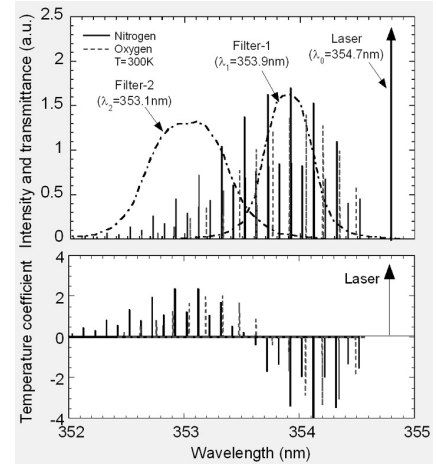


Fig. 3. Spectral distribution of the rotational Raman scattering for the UV laser.

Tab. 1. Specifications of the lidar system

Item	Specifications
Laser system	Nd: YAG, THG, center wavelength: 355nm, frequency: 20Hz, pulse energy: maximum 300mJ
Telescope	diameter 250mm with UV coating, FOV: 0.1mrad
Filters	Raman ch1 CWL: 353.9nm, FWHM: 0.49nm
	Raman ch2 CWL: 353.1nm, FWHM: 0.97nm
A/D and data interval	100 MSample/s by Lecroy LT584, Data interval: 1.5m
Averaging time	200 seconds (4000 shot)
Range resolution	30 m
Measurement property	temperature [K]
Measurement principle	temperature dependency of rotational Raman scattering intensity by atmospheric molecules
Measured range	up to 1.0 km

(2)データ処理

回転ラマン散乱法による気温計測では、二つの回転ラマン散乱チャンネルの高度別応答を光電子増倍管で捉えた後、その時系列データを平滑化し、さらに検出器補正や背景光除去を行う。その結果として得られた二つの回転ラマン散乱チャンネルの比から気温応答関数 $S(z)$ (但し z は高度[m]) を得る。

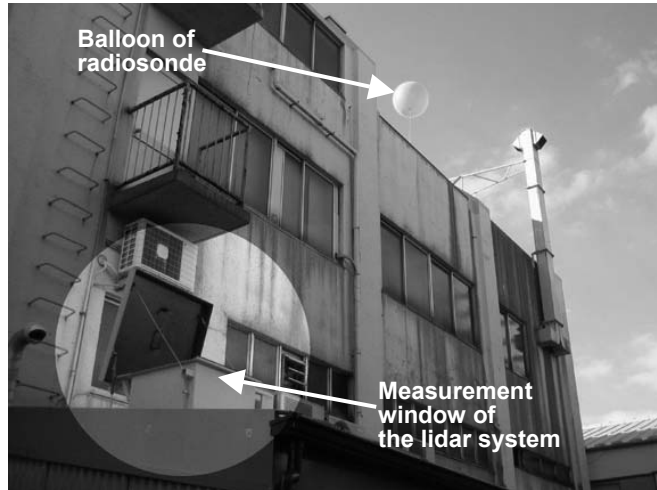
気温応答関数 $S(z)$ は、気温 $T(z)$ の二次関数として(1)式のように近似できるので、装置定数 A, B, C を用いることで高度別の気温 $T(z)$ を決定することができる。

$$\ln(S(z)) = A \cdot T(z)^{-2} + B \cdot T(z)^{-1} + C \quad (1)$$

3. 計測

ライダーとラジオゾンデの比較計測は、2004年2月21日15時から翌22日18時まで3時間間隔に行い、合計10回の比較計測を行った。計測場所は東京都渋谷区幡ヶ谷の英弘精機株式会社であり、ライダーシステムは社屋北側1階に設置されている。ラジオゾンデは屋上から放球した(Pic. 1参照)。

ラジオゾンデは、明星電気株式会社製RS-01G型GPSゾンデ(気温分解能0.1℃, 気温精度:±0.5℃, 湿度分解能:0.1%RH, 湿度精度:±7%RH)を使用した。ラジオゾンデは上空1,000mまでの観測に約4分間を要し、その間の風の影響による水平方向の位置ずれは1~2km程度である。



Pic. 1. The lidar system is located at north side of building. Ten radiosonde took off from the roof.

4. データ解析結果

ライダーによる気温データは、二つの回転ラマン散乱チャンネルデータと三つの装置定数により求まるが、(1)式に示した三つの装置定数A, B, Cは少なくとも一組のラジオゾンデとの比較により決定される。今回の調査では全てのデータセットについてこの装置定数を導出した後、データの品質チェックを行うことにより装置定数A, B, Cを決定した。結果的には、02/22 00:00から02/22 09:00までの4時刻を除く6時刻のデータセットの演算から得られたA, B, Cの平均値を決定した。この装置定数を全10データに適用し、データ解析を行った。

ライダーとラジオゾンデとの誤差を検討するために、各時刻のデータについて同一高度における両者の気温データを30点サンプリングし、ライダーとラジオゾンデとのRMS(自乗平均平方根)誤差を求めた。30点のサンプリングにおいては、ライダーのビーム重なり関数やS/Nに従う測定可能高度を考慮しながらサンプリングする高度範囲を決め、その高度範囲から等間隔に30データを取得した。RMS誤差、サンプリングのための最高高度と最低高度およびサンプリング間隔をTab. 2に示した。

Tab. 2. Analysis results of temperature errors between lidar and radiosonde.

Date Time (JST)	02/21 15:00	02/21 18:00	02/21 21:00	02/22 00:00	02/22 03:00	02/22 06:00	02/22 09:00	02/22 12:00	02/22 15:00	02/22 18:00	Min.	Max.	Ave.	
RMS error (K)	2.1	0.2	0.7	1.4	1.5	1.2	1.8	1.3	0.8	0.9	0.2	2.1	1.2	
Sampling altitude & resolution	Highest alt.(m)	1,165	980	1,163	653	972	953	1,015	1,058	995	1,173	653	1,173	1,013
	Lowest alt.(m)	296	300	300	29	203	268	228	291	307	301	29	307	252
	Resolution (m)	30	23	30	22	27	24	27	26	24	30	22	30	26

5. 考察

Tab. 2を参照すると、ライダーの計測結果は概ね高度1kmまでに渡りラジオゾンデとの比較が可能なデータが得られている。また、その高度範囲におけるライダーとラジオゾンデとの10時刻におけるRMS誤差は0.2Kから2.1Kを示し平均RMS誤差は1.2Kであった。従来は、昼間の計測は困難とされていたが、昼夜を問わない計測が実現できている。

装置定数の決定において、02/22 00:00から02/22 09:00までの4時刻の装置定数は、他の6時刻とは大きく異なる値を示していた。その状況を示すために、02/22 00:00から02/22 09:00まで以外の6時刻におけるラジオゾンデによる気温とライダーによる気温の散布図をFig. 4, 02/22 00:00から02/22 09:00までの4時刻における両者の散布図をFig. 5に示した。また、それぞれの代表的な測定例をFig. 6とFig. 7に示した。

Fig. 4によると、ラジオゾンデによる気温とライダーによる気温の線形性および傾きは良好である。これに対してFig. 5を参照すると、両者による気温の線形性は良好であるが、その傾きが急であり、気温の断熱減率がライダーによる気温データの方が大きいようである。この現象については、同時に計測していたレイリー散乱法による気温ライダーでも生じていた現象である。これらの結果を考慮すると、02/22 00:00から02/22 09:00までの4時刻についてはライダーの送受信系に何らかの問題(結露など)があった可能性がある。

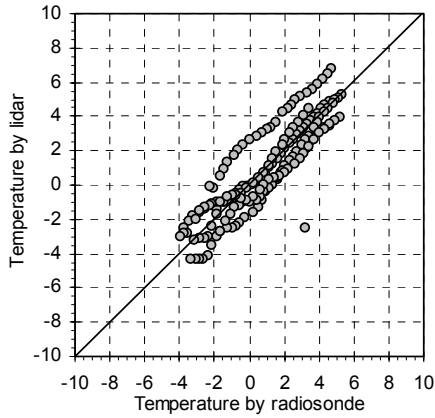


Fig. 4. Scatter gram of radiosonde and lidar temperature except data from 2005/02/22 00:00 to 09:00.

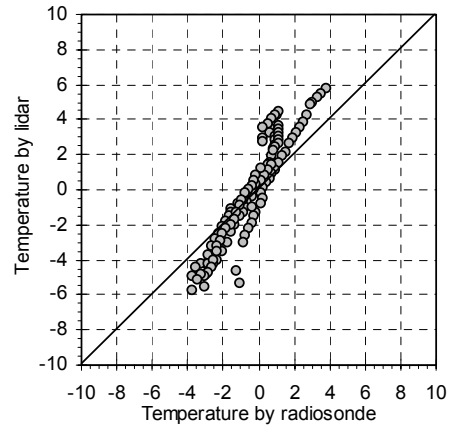


Fig. 5. Scatter gram of radiosonde and lidar temperature from 2005/02/22 00:00 to 09:00.

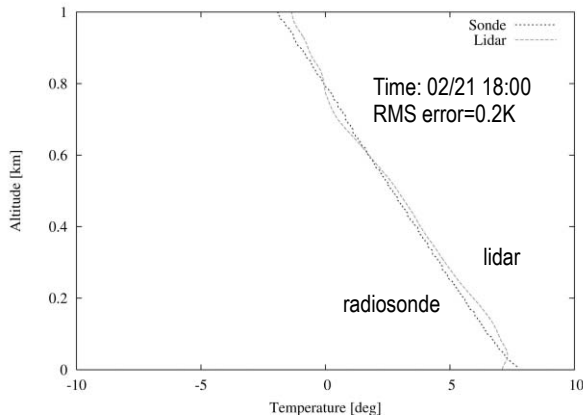


Fig. 6. Temperature profile of radiosonde and lidar at 2005/02/21 18:00, which shows minimum RMS error.

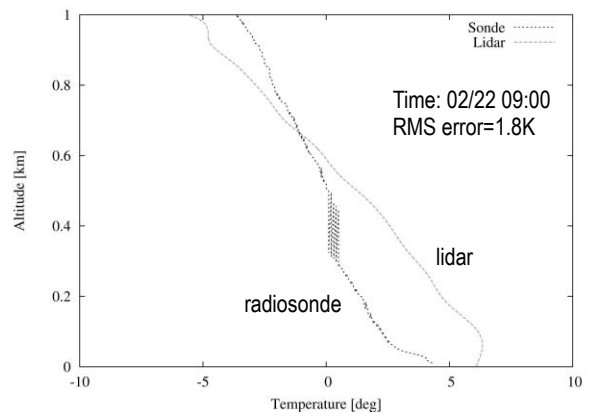


Figure 7. Temperature profile of radiosonde and lidar at 2005/02/22 09:00, which shows maximum RMS error and mismatch of adiabatic lapse rate.

6. まとめと今後の課題

当報告のまとめは次の通りである。

- 1) 回転ラマン散乱法による気温ライダー観測では、昼夜を問わず概ね高度 1km までの計測ができた。
- 2) 10 時刻のデータから最適な装置定数(A, B, C)を導出し、その装置定数を全 10 データに適用した。
- 3) ライダーとラジオゾンデとの比較の結果、10 時刻における RMS 誤差は 0.2K から 2.1K(平均 1.2K)を示した。
- 4) 一部のデータについて、ライダーの送受信系の問題によると考えられる気温勾配の差が認められた。

また、今後の課題は次の通りである。

- 1) 当報告と同様のラジオゾンデとの比較実験を 2005 年 8 月に計画しているので、その結果も考慮しながら回転ラマン散乱法による気温ライダーの安定性や実用性について検証したい。
- 2) 回転ラマン散乱法による気温ライダーの実用化について分光計部分の開発を別途進めているが、より高精度な光学系の取付調整、検知器アンプの時定数の高速化、計測系のノイズ対策、計測平均回数増加による高 S/N 化ほかを進めることで、高度 100m から 1,000m までにおける RMS 誤差が 1K 以内の分光計開発を完了させたい(2005 年秋に完成予定)。

謝辞

本研究においては首都大学東京工学研究科の境澤大亮氏にデータ処理に関する作業をしていただいた。ここに記し深甚なる謝意を表す。

参考文献

- ・内田清孝ほか(2004), 気温, 水蒸気, エアロゾル計測のためのレイリー・ラマン散乱ライダーによるデータ測定例, 第 23 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, EP-1.
- ・華灯鑫ほか(2004), 気温・水蒸気・エアロゾル計測のためのレイリー・ラマン散乱ライダーの開発, 第 23 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, AP-1.
- ・華灯鑫ほか(2003), 対流圏気温分布計測のための UV 域レイリー散乱ライダーシステムの開発, 第 22 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, pp35-38.