

B-4

共鳴散乱ライダーの受信散乱信号を用いたレーザー発振周波数校正実験 Calibration of laser frequency for Na temperature lidar using resonance scattering signal

*江尻省¹、中村卓司¹、C. Y. She²、川原琢也³

*Mitsumu K. Ejri¹, Takuji Nakamura¹, C. Y. She², Takuya D. Kawahara³

[1] 国立極地研究所、[2] コロラド州立大学、[3] 信州大学工学部

[1] National Institute of Polar Research, [2] Colorado State University, [3] Faculty of Engineering, Shinshu University

Abstract: Calibration of laser frequency is very important for mesospheric temperature measurements by metal atom resonance scattering lidars as sodium (Na) temperature lidar. A Na cell fluorescence spectrum can be useful for the calibration. However, it is not suitable for our lidar system because Na resonance frequency (589 nm) as a laser pulse is obtained by mixing two laser pulses (1064 nm and 1319 nm). A previous calibration method without Na cell, which is a curve fitting of simulated metal resonance line to scanned metal resonance line using the metal layer, takes time so it has difficulties in an accurate calibration. By applying three-frequency wind measurement method [She and Yu, 1994], we succeeded in calibration of laser frequency with a higher quality in a shorter time than the previous method. In this study, we report the new calibration method and the results.

1. はじめに

地球大気と宇宙空間の境界領域とも言われる中間圏界面付近において、この領域の大気ダイナミクスを議論するために必要不可欠な「温度」を測定するために、我々は、高度 80-110 km に存在するナトリウム原子層からの共鳴散乱を利用した、ナトリウム温度ライダー観測を行っている。ナトリウム温度ライダーでは、Doppler 拡がりをもつナトリウムの共鳴線 (D_2 線) の散乱断面積内の 2 周波に対してレーザーを同調し、その受信散乱信号比から温度を導出する[e.g., She et al., 1990, Bills et al., 1991]。温度の絶対値を数 K 以内の絶対精度で測定するためには、送信周波数を ± 10 MHz 程度以内で知る必要がある。レーザーのナトリウム共鳴線への同調法としては、ナトリウム原子を封入したセルを加熱してレーザー光を通過させたときに得られる蛍光スペクトルをモニターし、Doppler-free features と呼ばれる特定の周波数で見られる飽和スペクトルを利用する方法があるが、我々のライダーシステムでは 589 nm を別の波長のレーザーパルスの合成パルスとして得ており、この手法を適応することが難しいため採用していない。我々が観測に用いているナトリウム温度ライダーは、信州大学と国立極地研によって共同開発され、2000 年から 3 年間南極昭和基地で観測を行ったもので、ナトリウムの共鳴線である波長 589 nm のレーザー光を得るために 2 台の injection-seed 型 Nd:YAG レーザーを用いている。2 台の共振器から波長 1319 nm と 1064 nm を独立に発振させ、両者を非線形結晶 BBO (β BaB₂O₄) に入射させて和周波をとることで 589 nm を得ている。波長の狭帯域化は、seed レーザーを共振器に注入することで行い、波長の同調およびシフトは、seed レーザーを波長計 (Burleigh WA-1500) でモニターしてその読み取り値をもとに seed レーザーの温度制御にフィードバックをかけることで行う。つまりこのシステムでは、観測に用いたレーザー光の波長 (送信周波数) は、波長計による seed レーザーの読み取り値から間接的に計算されることになる。従って、波長計の読み取り値の絶対値 (絶対精度) を知ることが重要になる。そこで、我々は実際のナトリウム層からの受信散乱信号を用いて波長計の絶対精度の校正を行っている。これまでは、送信周波数を少しずつ変えて上空のナトリウム層を観測 (周波数スキャン) し、理論計算されるナトリウム D_2 線をフィッティングすることで送信周波数を求め、波長計の絶対精度の校正を行ってきた。しかしこの手法では、ナトリウム D_2 線全体 (幅 ~ 3 GHz) をスキャンする間にナトリウム層の密度や温度が無視出来ないほど変化するため、十分な精度で校正することが極めて難しいことが課題だった。今回、3 周波観測による温度・風速同時観測 [She and Yu, 1994] を応用した手法により、より短時間で精度の良い校正を行うことに成功したので、

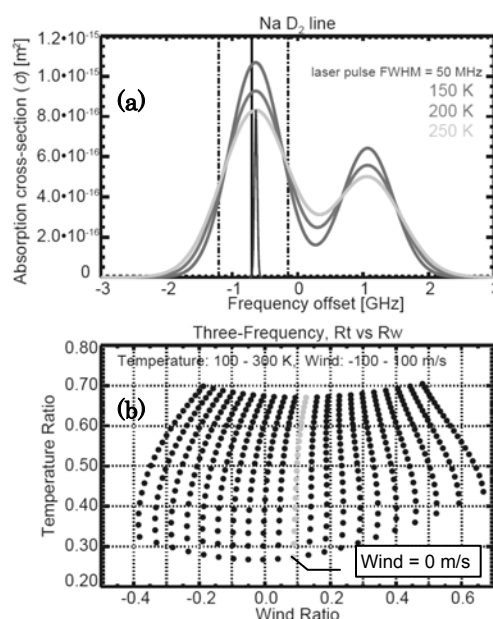


Fig. 1. (a) shows simulated Na D_2 lines for $T = 150$ K, 200K, and 250 K. (b) shows calibration curves calculated by absorption cross-sections at three frequencies as shown in (a) by vertical solid and broken lines.

その手法と結果を紹介する。

2. 校正手法

中間圏界面付近(約 80-110 km)に存在するナトリウム層を利用した風速の観測[She and Yu, 1994]は、ナトリウム共鳴散乱線(D₂線)の第一ピークに対して、ピークとその両側の適当な周波数(図 1(a)に縦の実線と点線で示したような周波数)の計 3 周波で観測を行い、D₂線が風によって Doppler shift することを利用して風速を求める。3 周波で観測した受信散乱信号強度を周波数の小さい方から I_m、I_p、I_a とすると、図 1(b)で示した校正曲線の縦軸(Temperature ratio: Rt)、横軸(Wind ratio: Rw)の値はそれぞれ

$$Rw = (I_p - I_m) / I_a \quad (1)$$

$$Rt = (I_p + I_m) / 2 * I_a \quad (2)$$

で与えられる。She and Yu [1994]では、この手法で斜め上空の観測を行い、平均鉛直風を 0 m/s と仮定することによって風速の水平成分を導出している。我々は、この手法で鉛直上空を観測した場合には風による Doppler shift が観測されないはず(平均鉛直風は 0 m/s)であることを利用して、観測された受信散乱信号の強度比(Rt, Rw)から 0 m/s でない風速が見積もられた場合には、それが風速による Doppler shift ではなく、波長計の読み取り値のずれ(オフセット)に起因した誤差であるとして、波長計のオフセットを逆算した。

3. 校正実験

校正実験に用いる 3 周波の組み合わせは、コロラド州立大学で使われている密度変化に対して信号強度比があまり変わらない(鈍感)組み合わせと、シミュレーションにより新たに見積もった温度変化に鈍感な組み合わせの 2 種類を試した。送信信号強度は約 200 mW、繰り返し周波数 10 Hz で、各周波数 1500 shots (2.5 分)の積算を行った。周波数の切り替えに 0.5 分がかかるので、3 周波(1 セット)の観測の所要時間は 9 分である。4 セット(約 30 分)を 1 回として、2 種類の周波数組み合わせを用いて、4 回ずつ(計 8 回)校正実験を行った。

4. 結果とまとめ

8 回の校正実験の結果、見積もられた誤差としての風速はいずれも ±10 m/s 以内、周波数に換算すると ±17 MHz 以内に納まっていた。また、それぞれの周波数組み合わせでの校正実験(4 回ずつ)の平均値の差は 10 MHz 以下であった。これらの平均値に対するデータのばらつき(標準偏差)を考慮して両者の中央値を取ると、観測周波数のオフセットは 278 MHz と見積もられた。以前の校正実験では 1 校正実験(1 スキャン)に 30 分以上かかったが、新しい手法では 1 校正実験(1 セット)に 9 分しかかからないため、ナトリウム層自体の密度・温度変化の影響を受け難く、より高精度の校正が可能となった。

このオフセットを考慮して、京都府宇治市で観測された 2007 年 10 月から 2009 年 1 月までのデータを再解析し、高度 87 km の月平均温度を米国の同緯度の観測点(コロラドとニューメキシコ)における過去の同様の観測結果と比較したのが図 2 である。日本と米国の観測値は、4 月から 9 月は非常に良い一致を示していることがわかる。一方、1-3 月と 10-12 月は日本の方が米国より優位に低くなっている。このことから、中間圏界面付近のダイナミクスには夏季よりも冬季に顕著な経度依存性がある可能性が示唆される。これに関しては、今後、より詳細な比較解析を行う予定である。

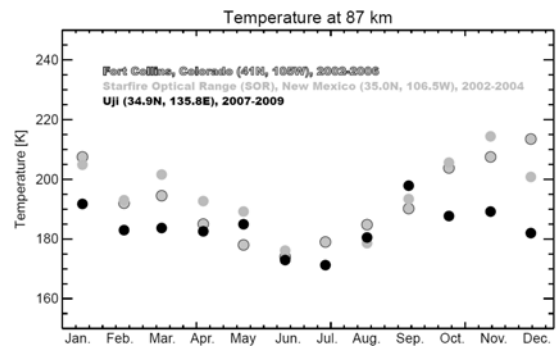


Fig. 2. Comparison of monthly mean temperature at 87 km between Uji in Japan and New Mexico and Colorado in the USA.

5. 参考文献

- Bills, R. E., C. S. Gardner and C. Y. She (1991), Narrowband lidar technique for sodium temperature and Doppler wind observations of the upper atmosphere. *Optical Engineering* 30, pp. 13-21.
- She, C. Y., H. Latifi, J. R. Yu, R. J. Alvarez II, R. E. Bills and C. S. Gardner (1990), Two-frequency lidar technique for mesospheric Na temperature measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 17, pp. 929-932.
- She, C. Y., and J. R. Yu (1994), Simultaneous threefrequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region, *Geophys. Res. Lett.*, 21, pp. 1771-1774.