

共鳴散乱ライダーの3周波観測による送信周波数の校正

Calibration of laser frequency for resonance scattering lidar by 3-frequency wind measurements

*江尻省¹、中村卓司¹、津田卓雄¹、西山尚典¹、阿保真²、小林喬郎³、C. Y. She⁴

*Mitsumu K. Ejri¹, Takuji Nakamura¹, Takuo Tsuda¹, Takanori Nishiyama¹, Makoto Abo², Takao Kobayashi³, C. Y. She⁴

[1] 国立極地研究所、[2] 首都大学東京、[3] 元福井大学、[4] 元コロラド州立大学

[1] National Institute of Polar Research, [2] Tokyo Metropolitan University, [3] former Fukui University prof., [4] Colorado State University

Abstract: We are developing a new resonance lidar system with multiple wavelengths and plan to install and operate it at Syowa (69S), Antarctica. The lidar will observe temperature profiles and variations of minor constituents such as Fe, K, Ca⁺, and aurorally excited N₂⁺. In order to do resonance scattering measurements for multi species, laser frequencies are tuned by a wavemeter instead of frequency locking using saturation spectrum of metal vapor cell. Although the laser frequency tuning by a wavemeter has some ambiguity, by applying 3-frequency wind measurement method [She and Yu, 1994], we succeeded in calibration of laser frequency with a higher quality during temperature measurements. In this study, we report the 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領域では、流体として振る舞いが支配的な中層大気（中性大気）と電磁気学的振る舞いが顕著な超高層大気（電離大気）の間で、力学的エネルギーや物質の交換が活発に行われている。特に極域では、太陽からの高エネルギー粒子が振り込むことにより、地球大気との間で、オーロラに代表されるような激しい大気現象を伴ったエネルギーや物質の流入・流出が起こっている。しかし、これらを議論するための基礎データである風速や温度の鉛直分布観測が十分でないため、定量的な議論が進んでいない。そこで我々は、南極昭和基地に、オペレーションの簡便化を図った遠隔制御可能な共鳴散乱ライダーを設置し、金属原子（カリウム、鉄）やイオン（カルシウムイオン、窒素イオン）の密度や温度の鉛直分布観測データを長期間定常的に得ることを計画して波長可変型共鳴散乱ライダーの開発を行っている。この共鳴散乱ライダーでは、複数の原子およびイオンの共鳴散乱観測を一つのシステムで行うために、波長計によるフィードバック制御によりレーザー周波数を共鳴散乱線に同調させるシステムを採用している。本研究では、このシステムで制御されたレーザー周波数を3周波風速観測の手法を応用することで校正した結果について報告する。

2. カリウム共鳴散乱ライダーによる温度・風速観測

高度 80-110 km に存在するカリウム原子層からの共鳴散乱を利用した中間圏の温度・風速観測としては、温度によるドップラー拡がりを持ち、かつ視線方向の速度によってドップラーシフトしたカリウムの共鳴線（D₁線、図1参照）をスキャン観測し、その半値幅と周波数シフトから温度および風速を導出する方法 [e.g., von Zahn and Hoffner, 1996] と、カリウム D₁ 線内の3周波に対してレーザー周波数を同調させ、その受信散乱信号比から温度と風速を導出する方法 [Friedman et al., 2003] がある。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ため、スキャン法を採用している von Zahn and Hoffner [1996] は、1 ショット毎にファブリ・ペロー干渉計を使ってレーザー周波数を計測している。また、3周波法を採用している Friedman et al. [2003]は、加熱したカリウム原子セルに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、ドップラーフリーと呼ばれる特定の周波数で見られる飽和スペクトルの一つにレーザー周波数を同調させている。さらに、その周波数を中心に音響光学素子で周波数を±475 MHz シフトさせることで3周波を得ている。どちらの手法も送信レーザーの絶対周波数を知った上で観測可能である点は優れているが、我々が目指す、複数種の共鳴散乱を利用し、かつオペレーショ

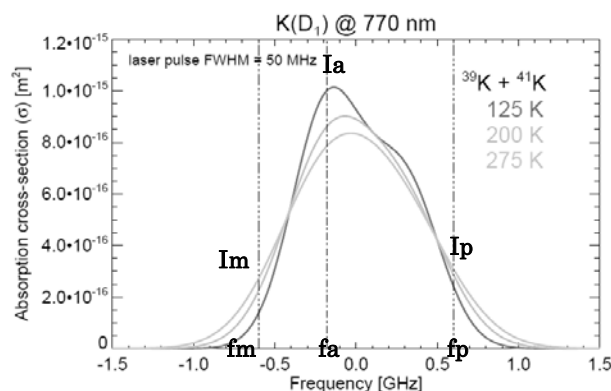


Fig. 1. Variation of the absorption cross-section of the K (D₁) transition with temperature for ³⁹K+⁴¹K. Three curves show calculated backscatter cross sections for T = 125 K, 200 K, and 275 K assuming laser pulse FWHM of 50 MHz.

ンが容易なライダーシステムに組み込むには、設計、操作、維持管理等が複雑になり過ぎる。そこで我々は、種レーザーの周波数を波長計でモニターし、これにフィードバックをかけることによってレーザー周波数を制御する方式を採用している。この手法では、種レーザーの周波数安定化に時間がかかるため、スキャン法による温度観測には向かない。また、レーザー周波数精度が波長計の測定精度に依存するため、波長計の校正を定期的に行う必要がある。以前我々は、3周波法では、平均鉛直風を 0 m/s と仮定することでレーザー周波数の校正が可能になることをナトリウム温度ライダーを使って確認した[Ejiri et al., LSS27, 2009]。これをカリウム共鳴散乱ライダーに適応し、温度観測を中断することなく、レーザー周波数の校正を行った。

3.3 周波法によるレーザー周波数の校正実験と結果

カリウム層を利用した温度と風速の観測は、カリウム D₁ 線のピーク付近 (図 1 で一点破線で示された周波数 : fa) とその両側の適当な周波数 (図 1 で三点破線で示された周波数 : fm, fp) の 3 周波で観測を行い、D₁ 線が温度によるドップラー広がりで変形すること、および風によってドップラーシフトすることを利用して温度と風速を求める。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 Im, Ia, Ip とすると、

$$R_t = (I_p + I_m) / (2 * I_a) \quad (1)$$

$$R_w = (I_p - I_m) / I_a \quad (2)$$

で与えられる信号強度比 (Temperature ratio: Rt、Wind ratio: Rw) と温度・風速の関係は図 2 のようになる。鉛直上空を観測した場合には、風速によるドップラーシフトが観測されない (平均鉛直風は 0 m/s) はずで、観測された Rt、Rw から導出される風速が、送信レーザー周波数の種レーザーの設定周波数からのずれに起因した誤差であるとして、送信レーザー周波数の絶対値を逆算する。

2014 年 2 月 25 日に行った 3 周波観測の結果を図 3 に示す。受信信号プロファイルを時間方向に 60 分、高度方向に 990m 積算して温度および風速を導出し、それぞれを高度 85-90km で平均した値 (黒点) とその標準偏差 (エラーバー) が示されている。一晩の平均鉛直風速は-46.3m/s で、これは-60.1MHz の周波数ずれに相当する。一方で、波長計の絶対周波数校正を行うために、種レーザー光がカリウム蒸気セルを往復通過する際に得られる蛍光スペクトルを観察し、ドップラーフリーの理論的な周波数と波長計の読み取り値を比較した。その結果、波長計の絶対周波数は +123.2MHz のオフセットを持っている、つまり、波長計の読み取り値から 123.2MHz 引いた値が真の周波数であることが分かった。これに対して、波長計の読み取り値から 60.1MHz 引いた値が送信レーザーパルスの周波数であった、ということは、送信レーザーパルスの周波数が種レーザーの周波数に対して 64.1MHz 高周波数側にずれていたことになる。我々の共鳴散乱ライダーシステムでは、送信レーザーとしてアレキサンドライト・リングレーザー (Light Age 社製) を用いているが、この周波数差について問い合わせたところ、50-100MHz 高周波側にずれる特性があるとの回答を得、本手法で送信レーザーパルスの絶対周波数を校正可能であることが確認された。

参考文献

- Friedman, J. S., C. A. Tepley, S. Raizada, Q. H. Zhou, J. Hedin, R. Delgado (2003), Potassium Doppler-resonance lidar for the study of the mesosphere and lower thermosphere at the Arecibo Observatory, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 65, 1411-1424.
 von Zahn and Hoffner (1996), Mesopause temperature profiling by potassium lidar, *Geophys. Res. Letters*, 23, 141-144.

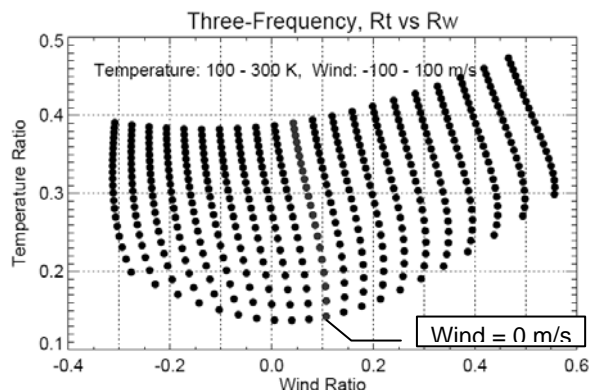


Fig. 2. Scatter plot of calculated Rw and Rt by absorption cross-sections at three frequencies as shown in Fig1 by vertical broken lines.

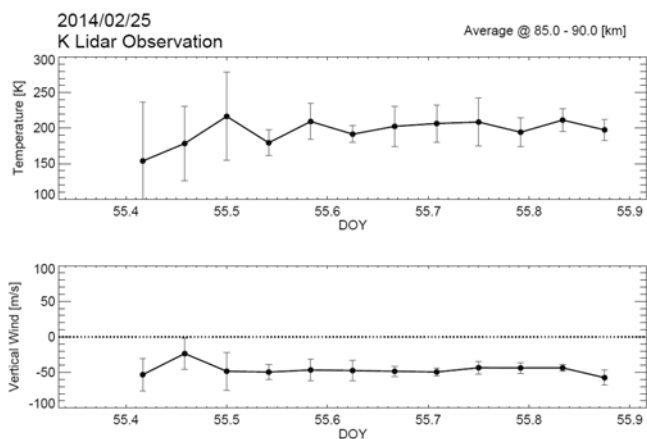


Fig. 3. Time variations of temperature and vertical wind observed by 3-frequency measurements on 25 February, 2014.