

カリウム共鳴散乱ライダーによる3周波観測のための最適周波数の検討 Examination of optimum frequencies for 3-frequency measurement by potassium resonance lidar

*江尻省¹、中村卓司¹、阿保真²

*Mitsumu K. Ejri¹, Takuji Nakamura¹, and Makoto Abo²

[1] 国立極地研究所、[2] 首都大学東京

[1] National Institute of Polar Research, [2] Tokyo Metropolitan University

Abstract:

Mesopause region is a boundary of neutral atmosphere and ionospheric plasma, and they interact each other actively. However, the interactions are still not understood quantitatively due to the lack of observations, especially in Polar Regions. 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 this study, we examine optimum frequencies in order to determine temperature profiles and vertical wind speed (= offset of laser frequency) by 3-frequency measurements with a potassium (K) resonance lidar.

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、メンテナンス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。本研究では、中間圏温度の観測に利用する予定のカリウム共鳴線について、特に絶対温度導出のための最適な観測周波数の検討を行う。

2. カリウム共鳴散乱ライダーによる温度観測

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観測としては、ドップラー拡がりをもつカリウムの共鳴線（D₁線、図1参照）をスキャン観測し、その半地幅から温度を導出する方法 [e.g., von Zahn and Hoffner, 1996] と、カリウム D₁線内の2周波もしくは3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方法 [e.g., She et al., 1990; 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。どちらの手法もレーザー周波数を正確に知れる点では優れているが、我々が目指す、複数種の共鳴散乱を利用するメンテナンスフリーの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、共振機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する予定である。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

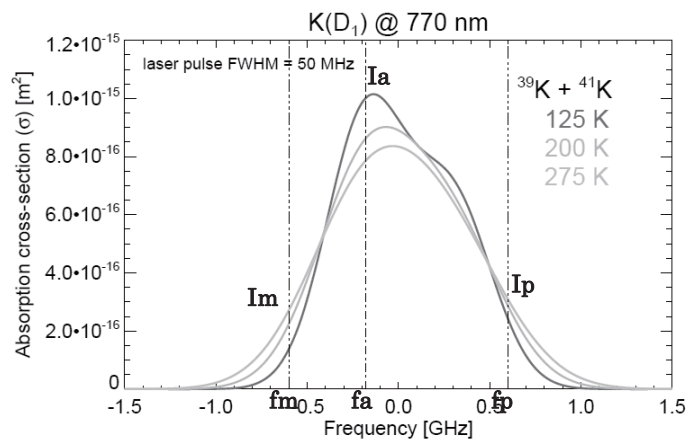


Fig. 1. Variation of the absorption cross-section of the K (D₁) transition with temperature for ³⁹K+⁴¹K. Three curves show calculated backscatter cross sections for T = 125 K, 200 K, and 275 K assuming laser pulse FWHM of 50 MHz.

測定精度に依存するため、波長計のキャリブレーション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キャリブレーション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すると、温度観測を中断することなく、レーザー周波数のキャリブレーションが可能になる。

3. 最適レーザー周波数の検討と結果

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、

$$Rw = (Ip - Im) / Ia \quad (1)$$

$$Rt = (Ip + Im) / (2 * Ia) \quad (2)$$

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。我々は、鉛直上空を観測した場合には風によるドップラーシフト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 Rt, Rw から導出される風速が、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する。

まず、キャリブレーションのための最適な周波数の組み合わせを考えるに当たって、各波長での受信信号のショットノイズによる周波数推定の不確定性(誤差)を見積もった。ある周波数 ν での散乱断面積を $\sigma(\nu)$ とすると、定数 M を用いて受信信号のカウント値は $M * \sigma(\nu)$ と表すことが出来る。この場合のショットノイズは $(M * \sigma(\nu))^{1/2}$ となる。これに対応する周波数軸上の誤差 (Error) を図 3 に示した。

$$\text{Error} = (\sigma(\nu) / M)^{1/2} / (d\sigma(\nu) / d\nu) \quad (3)$$

一方、温度を高精度で観測するためには、温度変化に対して散乱断面積が大きく変化する周波数を使う必要がある。そのような周波数として Friedman et al. [2003]でも採用されている、相対周波数 -180 MHz (カリウム D₁ 線の中心波長 770 nm に対応する周波数を 0 としたときの相対的な周波数) を fa として使う。残りの2周波 (fm, fp) として、図 3 で検討した誤差が小さく、かつ風速が 0 m/s のときの Rt ($Rt_{(v=0m/s)}$) が温度変化に対し

て最も敏感になる周波数の組み合わせを検討した。具体的には、相対周波数 -1.0 - 0.2 GHz、3.0 - 1.0 GHz で fm, fp を変え、275 K と 125 K の $Rt_{(v=0m/s)}$ の差が最も大きくなる周波数の組み合わせを探した。その結果、fa = -180 MHz であるとき、fm = -560 MHz、fp = 650 MHz のときに $Rt_{(v=0m/s)}$ が温度変動に対して最も敏感になることが分かった。今後、この周波数を使って実際に観測を行い、結果を検証する予定である。

4. 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.
- 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.
- von Zahn, U. and J. Höffner (1996), Mesopause temperature profiling by potassium lidar, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 141-144.

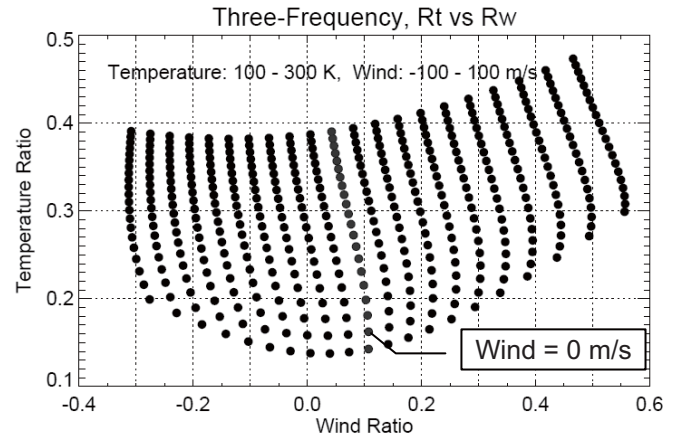


Fig. 2. Scatter plot of calculated Rw and Rt by absorption cross-sections at three frequencies as shown in Fig1 by vertical broken lines.

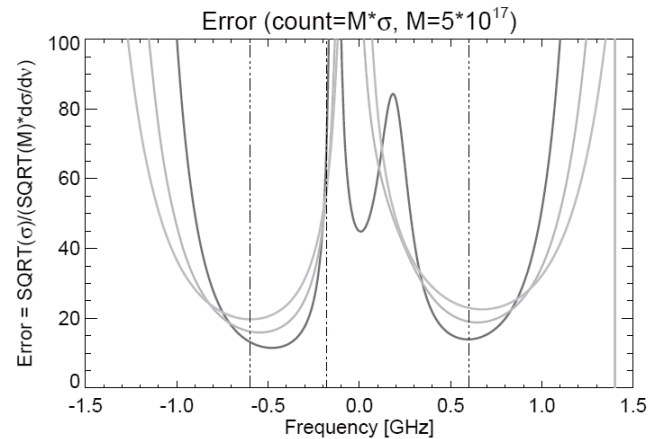


Fig. 3. Calculated errors for T = 125 K, 200 K, and 275 K using equation of (3). Vertical broken lines show same 3 frequencies (fm, fa, fp) as Fig1.