

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観測周波数検討 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、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。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った。

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、ドップラー広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、その半値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 [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し、かつオペレーショ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、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

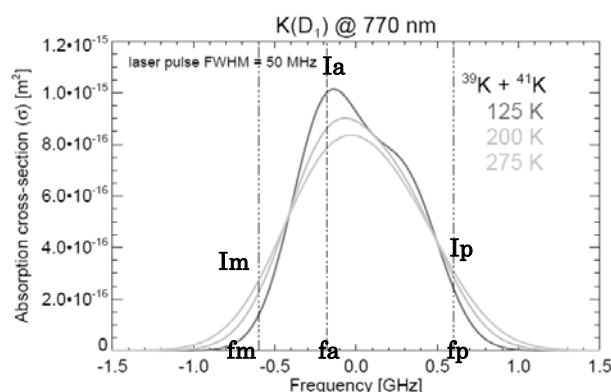


Fig. 1. Variation of the absorption cross-section of the K (D₁) transition with temperature for ³⁹K+⁴¹K. Three curves show calculated backscatter cross sections for T = 125 K, 200 K, and 275 K assuming laser pulse FWHM of 50 MHz.

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 D_1 線のピーク付近 (図 1 で一点破線で示された周波数: f_a) 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: f_m, f_p) の 3 周波で観測を行い、 D_1 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 I_m, I_a, I_p 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: R_t 、Wind ratio: R_w) 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 R_t, R_w 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。測定誤差 ($\Delta I_m, \Delta I_a, \Delta I_p$) による R_t, R_w への伝播誤差 ($\Delta R_t, \Delta R_w$) は、式(3)、(4)で与えられる。

$$(\Delta R_t)^2 = (I_a^2 * ((\Delta I_p)^2 + (\Delta I_m)^2) + (I_p^2 + I_m^2)^2 * (\Delta I_a)^2) / (4 * I_a^4) \quad (3)$$

$$(\Delta R_w)^2 = (I_a^2 * ((\Delta I_p)^2 + (\Delta I_m)^2) + (I_p^2 + I_m^2)^2 * (\Delta I_a)^2) / I_a^4 \quad (4)$$

温度観測およびレーザー周波数キャリブレーションのための最適な観測周波数の組み合わせを考えるために、 I_m と I_p の組み合わせを変えたときの伝播誤差の変化を調べた。カリウム層の典型的な密度とカリウム共鳴散乱ライダーシステムの緒元は表 1 に示した。まず、このライダーシステムで 3 周波それぞれを 1 分積算 (温度・風速測定の間分解能は約 4 分)、高度分解能 1 km で観測した場合の受信信号値をライダー方程式を用いて見積もり、次に、受信信号のショットノイズによる伝播誤差 ($\Delta R_t, \Delta R_w$) を計算、それを温度と風速の誤差に換算した値を図 3 に示した。この観測モードの場合、相対周波数 (カリウム D_1 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) が、 $f_m = -820$ MHz、 $f_p = 940$ MHz のときに温度誤差が最小 (2.1 K) に、 $f_m = -720$ MHz、 $f_p = 700$ MHz のときに風速誤差が最小 (1.7 m/s) になった。温度誤差が最小になるときの風速誤差は 2 m/s で、これをレーザー周波数誤差に換算すると 2.6 MHz である。従って、 $(f_m, f_a, f_p) = (-820, -180, 940)$ MHz の 3 周波で観測を行った場合、時間分解能 4 分、高度分解能 1 km で、数 MHz 以内でレーザー周波数を校正しながら誤差 2.1 K の温度観測が期待できることが分かった。

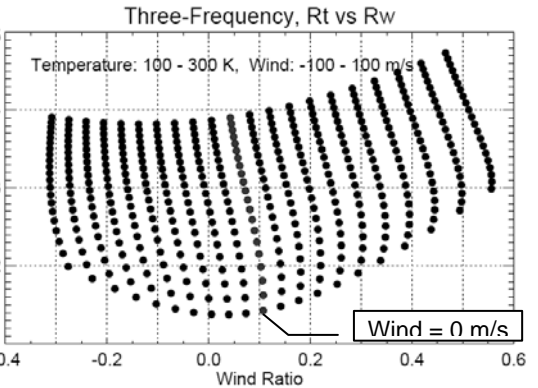
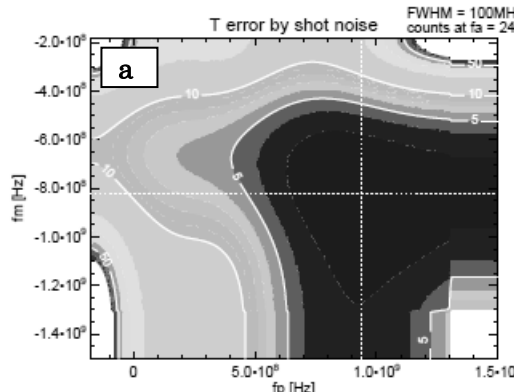


Fig. 2. Scatter plot of calculated R_w and R_t by absorption cross-sections at three frequencies as shown in Fig1 by vertical broken lines.

Table 1. Specifications of K layer and K lidar system.

λ (nm)	769.896
height (km)	90
laser power (J)	0.4
repetition	20
time resolution (sec)	60
height resolution L (m)	1000
Telescope Ar (m ²)	0.527834 ($\phi = 0.82$ m)
$Y(r) (= 1)$	1
$\beta(r)$ (m ² /sr)	7.00E-17
	[von Zahn and Hoffner, 1996]
Abundance (/m ³)	4.50E+07
	[e.g., Gardner et al., 2004]
τ_{atm} (x100%)	0.8 [Gardner et al., 2004]
τ_{system} (x100%)	0.5
τ_{PMT} (x100%)	0.2

Planck constant (Js) = 6.63E-34

Light speed in vacuum (m/s) = 3.00E+08

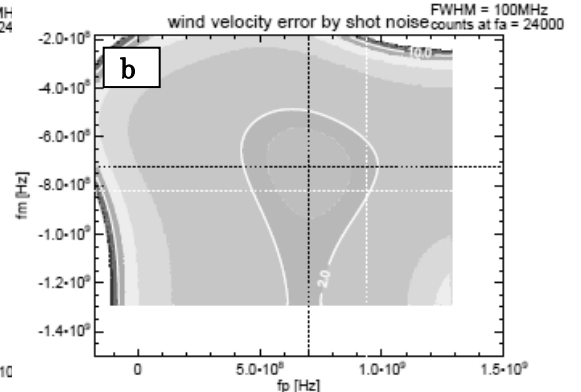


Fig. 3. Distribution of propagation error on temperature (a) and on wind speed (b) measurements with a temporal resolution of 4 min and a height resolution of 1 km. When the 3 frequencies (f_m, f_a, f_p) equal to (-820, -180, 940) MHz, temperature error is minimum and errors on temperature and wind speed are 2.1 K and 2 m/s, respectively.