

特集 ライダー観測 I

狭帯域レーザーを用いたナトリウムライダーによる 中間圏界面の温度・風速計測

川原 琢也*¹, 野澤 悟徳², 斎藤 徳人³,
津田 卓雄⁴, 川端 哲也², 和田 智之³

¹ 信州大学 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

² 名古屋大学 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

³ 理化学研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

⁴ 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

Mesopause temperature and wind observations by a narrowband Na lidar

Takuya D. Kawahara*¹, Satonori Nozawa², Norihito Saito³,
Takuo T. Tsuda⁴, Tetsuya Kawabata³ and Satoshi Wada³

¹Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi, Nagano 380-8553

²Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601

³RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

⁴University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

(Received January 17, 2022; revised February 11, 2022; accepted February 15, 2022)

Metallic atoms, such as Na, K, Li, Ca, Fe, etc., originating from meteors are concentrated and forms metal layers in the mesopause region (80–115 km) in the Earth's upper atmosphere. This paper details Na lidar observation techniques to measure temperature and line-of-sight wind velocity in the Na layer. The technique needs a narrowband 589 nm laser and a measurement of a fine structure Doppler-free spectrum of the NaD₂ lines. Based on the robust and reliable measurement techniques established by a Colorado State University group, an Nd:YAG-based Na lidar was deployed at EISCAT (European Incoherent Scatter) radar site (69.6°N, 19.2°E) in Norway in 2010. Utilizing the advantages of the high power (4 W) laser output, five-direction observations are performed to measure spatial distribution of temperature and wind velocity.

キーワード：狭帯域レーザー，ナトリウムライダー，Nd:YAG，中間圏界面

Key Words: narrowband laser, sodium lidar, Nd:YAG, mesopause

1. はじめに

地球大気で最も温度が低い領域である中間圏界面（高度 80–115 km 付近）には、流星起源の Na, K, Li, Ca, Fe などの金属原子層が存在する¹⁾。Na ライダーは、この層に向けて共鳴波長である NaD₂ 線（589 nm）のパルスレーザーを射出し、共鳴散乱光強度の時系列計測から Na 密度（現在では背景温度、風速）を高時間、高高度分解能で計測する観測器である。1960 年に初めてルビーレーザーの発振が確認され、1969 年には早くも Na ライダーによる Na 密度計測の報告がされた²⁾。そこから半世紀経った現在も Na ライダーがこの高度領域の主要な観測器として位置付けられている理由は、ライダー観測手法の精密化により、大気物理の議論

に重要な背景温度と風速の計測が可能となったからである³⁾。それには時代と共に進化し続けるレーザ技術も大きく関係している。本論文では、Na ライダーの精密観測手法の発展を軸に、観測原理とシステムの概要について述べる。また、Norway, Tromsø (69.6°N, 19.2°E) の EISCAT (European Incoherent Scatter) レーダー観測所に設置した Nd:YAG レーザベースの Na ライダーについても紹介し、今後の発展性について述べる。

2. NaD₂ スペクトルの精密計測にともなう Na ライダー観測の進化

2.1 Na 密度観測

世界で初めて報告された共鳴散乱ライダーは Na 観測で、1969 年である²⁾。Na 原子には励起エネルギーが近接した 6 本 (3 本+3 本) の電子の遷移帯 (NaD₂ 線) が存在し、589.1583 nm の光エネルギーの吸収と再放出を行う (共鳴散乱)。原子の吸収線は離散的であるが、熱運動をしている Na 原子群を地上から観察すると、Doppler broadening により吸収線が 2 つ山の連続スペクトルとなる⁴⁾ (Fig. 1)。ここで、NaD₂ スペクトルは光の周波数 ν の関数で、そのグラフは慣習的に $\lambda_0 = 589.1583$ nm の周波数 ν_0 を中心とする相対周波数で表されるので、本論文でもその表記とする。周波数幅と波長幅のおおよその換算は波長 589 nm において 1 GHz ~ 1 pm である。

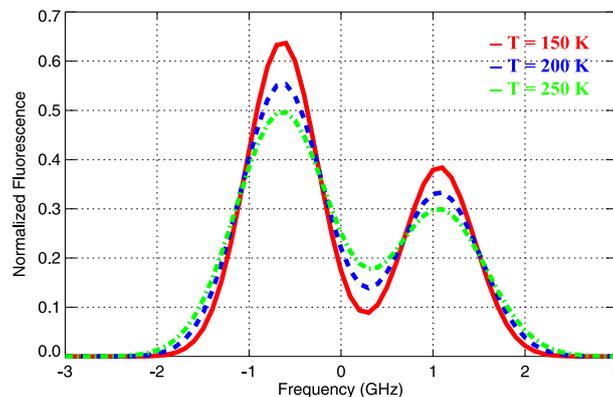


Fig. 1 Differential backscattering cross sections of NaD₂ transition at 150 K (red), 200 K (blue) and 250 K (green).

Na ライダーでは、射出レーザの波長を NaD₂ 線に同調させることで、Na 共鳴散乱光の強度観測を行う。初期の Na ライダーでは主に色素レーザが用いられ⁵⁾、NaD₂ 線よりも広いスペクトル幅のレーザであったため温度情報は得られず Na 密度の計測に限られたが、世界各国で観測されてきた⁶⁻⁹⁾。日本は元々、大気ライダーのアクティビティは高く、1973 年には日本気象学会誌で、「ライダー (レーザー・ライダー) と気象観測」という特集号が組まれている¹⁰⁾。日本の Na ライダー観測では、1984 年越冬の南極昭和基地での観測¹¹⁻¹³⁾、東京都八王子市で特に頻繁に観測されるスポラディック Na の観測¹⁴⁾、京都大学生存圏研究所信楽観測所における MU (Middle and Upper atmosphere) レーダーと Na ライダーの同時観測¹⁵⁻¹⁷⁾などで成果をあげてきた。

2.2 温度観測

中間圏界面の大気は原子分子同士が十分に衝突をしているので (衝突周波数 10^5 回/s)、Na は背景大気と温度平衡に達している¹⁸⁾。このため、早くから Na をトレーサーとして背景の大気温度を計測する試みが行われてきた⁴⁾。ライダーによる Na 層温度の導出は 1980 年代には実証されていたが¹⁹⁾、現在の高時間分解能観測手法を確立したのは、コロラド州立大学とイリノイ大学の合同グループで、1990 年頃である²⁰⁾。この手法は 2 周波数法と呼ばれ、NaD₂ スペクトル内の 2 周波数に交互にレーザ周波数を合わせ、2 周波数の散乱光強度から Na 温度を導出する。ここで、ライダーの受信光強度は、射出レーザ強度、大気の透過率や NaD₂ 線の散乱断面積などの値を元にライダー方程式という理論式を用いて計算できる。ライダー方程式を

以下に示す.

$$n(z) = n_0 \cdot T_A(z)^2 \cdot T_{Na}(z)^2 \cdot \{N_{Na}(z) \cdot \Delta z \cdot \sigma(T, \nu)\} \cdot \left(\frac{A}{z^2}\right) \cdot \eta + n_b$$

ただし,

$n(z)$: 高度 z [m]からの受信光子数

n_0 : 上空に射出する送信レーザの光子数

$T_A(z)$: 地上から高度 z [m]までの大気の透過率

$T_{Na}(z)$: 地上から高度 z [m]までの, Na 原子の共鳴散乱による透過率

$N_{Na}(z)$: 高度 z [m]における Na の数密度[m⁻³]

Δz : 高度分解能[m]

$\sigma(T, \nu)$: Na 原子の微分散乱断面積[m²]. T は大気温度[K], ν は光周波数[Hz].

A : 望遠鏡の受光面積[m²]

η : 受信系ミラーの反射率, レンズの透過率, などの光学効率

n_b : 背景光の光子数

ところで最も不可思議と思われるのは, 外乱に容易に影響を受け大きく変化するはずの受信光強度 $n(z)$ の観測で, なぜ絶対温度や, 以下に示す絶対風速を求めることができるのか, である. 2周波数法の原理は, 次の通りである. データ解析ではまず, 各観測周波数における受信光データから背景光を除去し, 高度 30 km の大気のレイリー散乱光強度を用いてレーザ光強度 (射出フォトン数) の規格化を行う. 規格化した後の2周波数それぞれの受信光強度を $n_a(z)$ と $n_c(z)$ とする. 受信系の光学効率や観測時の大気透過率は実際には測定が困難あるいは不明であるが, 観測に用いる2周波数は極めて近接しているため (周波数差: 約 1 GHz~波長差: 約 1 pm), 光学効率も大気透過率も等しいと仮定する. ここで, 受信光強度比 n_c/n_a をとるとそれらの不明な値がすべてキャンセルされ, 2周波数での微分散乱断面積の比 σ_c/σ_a に等しくなる. $\sigma_c(T, \nu_c)$ と $\sigma_a(T, \nu_a)$ の値は Na 温度 T のみの関数であるため, 高度 z ごとの n_c/n_a の値は 1 対 1 で Na 温度に対応できる.

この観測で最も重要な点は, 射出レーザ周波数を固定して観測を行い, その観測周波数に基づいて解析を行うことである. 絶対周波数をモニターし, それに基づき観測レーザ周波数を固定し, その周波数で解析を行う. これを実現するためにコロラド州立大学では, 実験室における Na セルを用いた Doppler-free 飽和分

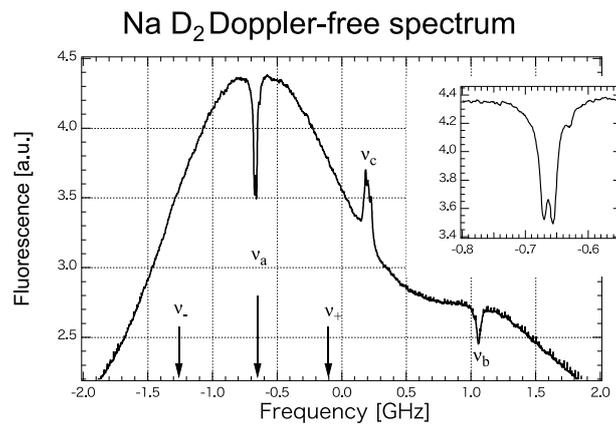


Fig. 2 Example of measured sodium Doppler-free absorption spectrum with a spectrum resolution of ~ 1 MHz in shown in GHz in the frequency scale relative to the $3^2P_{3/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$ transition at 16973.36 cm^{-1} (589.158 nm): large dips at the Na D_{2a} ($\nu_a = -0.6514$ GHz) and enhancements at the crossover ($\nu_c = 0.0188$ GHz) are clearly seen. The down- and up-shifted frequencies are respectively at -1.2814 GHz and -0.0214 GHz. The probing laser power used for this spectrum is 0.3 mW, resulting in Doppler-free features relatively free from power broadening. The feature around the D_{2a} peak is expanded as an insert in the upper right corner, and the laser is locked at the deepest dip at -0.651 GHz²⁹⁾.

光法による超高解像度の周波数スペクトル計測手法も同時に確立した²¹⁻²³⁾。Fig. 2は、そのスペクトルを示す。レーザ光をスキャンし、特殊な光学的配置を用いてNaセルからの共鳴散乱光を計測する手法だが、例えばNaD_{2a} peakに見られる超微細スペクトル(図の右上の拡大図)が1 MHz(約0.001 pm)以下の精度で計測可能である。これをもとにレーザ周波数をNaD_{2a} peakにロックする。温度観測では、散乱断面積が温度変化に敏感で逆位相の周波数 ν_a (D_{2a} peak)と ν_c (crossover)で観測光強度の比をとる(Fig. 1参照)。スペクトル全体のスキャン観測ではなく、2周波数観測なので高時間分解計測が可能である。この観測手法により、Naライダーは中間圏界面温度の観測に必須の重要な位置づけとなった。

2.3 風速観測

Na原子を含んだ空気塊が移動すると、地上からはスペクトル形状を保ったまま周波数シフトしたNaスペクトルとなる(Doppler shift)。Naライダーではこの周波数シフトを検出し、速度を算出する。中間圏界面では水平風が卓越しており、水平風速の計測にはレーザ射出方向を鉛直から一定角度傾け、射出方向のDoppler shift量から速度成分を計測する。Doppler shiftによるスペクトルのずれは1 MHzが約0.6 m/sに対応するため、絶対風速の計測に必要なレーザ周波数のロック精度も1 MHz(約0.001 pm)が求められ、それを実現している。

コロラド州立大学のグループは1994年に、温度、風速、Na密度が同時に計測可能な3周波数法を報告した^{8, 23)}。基本原理は2周波数法と同じで、絶対周波数で決めるNaD₂スペクトル内の3周波数にレーザ周波数をロックし、受信光強度の比を散乱断面積の比に対応させ、温度、風速を求める。ロックするレーザ周波数は、 $\nu_a = -0.6514$ GHzと ν_a を中心に ± 630 MHzシフトさせた、 $\nu_+ = -0.0214$ GHz、 $\nu_- = -1.2814$ GHz、の3周波数を用いる(Fig. 2)。コロラド州立大学のグループが用いたレーザは、狭帯域リング色素レーザ(589 nm)とそれをパルス増幅するPDA(Pulse Dye Amplifier)で構成される。ここで、レーザの周波数を高速で正確に切り替える手法として、音響光学素子を用いた周波数シフター(Acousto-Optic Frequency Shifter)を用いている。リングレーザの光路に設置した2台のAO周波数シフターにより、ロックする基準周波数(ν_a)からそれぞれ+630 MHzと-630 MHzの周波数シフトを行う。それを種レーザとし、PDAを用いてパルス増幅している。本手法も超微細構造をもつDoppler-freeスペクトル計測を行い、それに基づくレーザ周波数制御が必須となる。

この精密計測手法により、Naライダーにおける温度、風速、Na密度の観測手法は確立したといえる。

3. Na温度/風速ライダーの北極域観測への応用

信州大学では、Nd:YAG固体レーザ²⁴⁾を用いて南極観測用のNa温度ライダーを構成し、2000-2002年に昭和基地(69°S, 39°E)で観測を行った²⁵⁻²⁸⁾。極域において1名で運用するライダー連続観測成功の可否は、レーザと自動計測システムの安定性に大きく依存する。昭和基地で部品からレーザを組み立てた経験は、次の極域観測ライダーの作り込みの思想の下地となった。主著者は帰国後、コロラド州立大学とイリノイ大学の研究者として、南極データ解析とライダー観測に携わり、さらに知識を深めた。米国から帰国後2004年には、NorwayのTromsø(69.6°N, 19.2°E)のEISCAT(European Incoherent Scatter)レーダー観測所に設置するため、名古屋大学/理化学研究所と共同でNa温度/風速ライダーの開発を開始した²⁹⁾。信州大学はNaライダー観測手法の熟知、名古屋大学は極域大気レーダ観測³⁰⁻³¹⁾、理化学研究所はすばる望遠鏡のレーザガイドスター用Naレーザ製作³²⁾、の背景をもつ。開発過程は、大学院生教育にも最適であった。Tromsøのライダーは、固体レーザで温度/風速計測のための精密な周波数制御を実現し、高出力と高安定化で人的負担を大幅に減らし、2010年から北極域で厳冬期の連続観測を実現してきた³³⁻³⁶⁾。

ここで、固体レーザを用いたNaライダーシステムについて述べる。共鳴散乱ライダーのレーザ周波数は対象原子の共鳴散乱周波数であるため¹⁾、一般的に、発振周波数の自由度がない固体レーザで構成することは容易ではない。しかしNaライダーは偶然にも、Nd:YAG結晶のみを用いて独立に1064 nmと1319 nmの基本波レーザ光源が構成でき、非線形光学結晶を用いて周波数の和の589 nmのコヒーレント光を生成することができる²⁴⁾($\nu_{1064} + \nu_{1319} = \nu_{589}$)。Nd:YAGレーザは安定で汎用性があり、発振特性がよく知られた現在最も信頼できるレーザの一つで、このレーザをベースにしてNaライダーを構成できるメリットは計り知れない。また、injection seeding方式(後述)のNd:YAGレーザなら、種レーザ(seeder)を用いて狭帯域の

589 nm 連続光を生成することが可能で、温度/風速計測 Na ライダーと全く同じ手法でレーザ周波数の精密モニターと制御が可能である²⁹⁾。すなわち Na ライダーにおいては、589 nm 光源に固体レーザが用いられただけではなく、Doppler-free 飽和分光法を用いた絶対周波数モニターと周波数制御手法までもがそのまま適用できることになる。

Tromsø のライダーは、送信系、受信系、制御系が日本から輸送した3台の冷凍コンテナ内にそれぞれ収められ、EISCAT レーダー観測所の野外に設置されている。レーザは injection seeding 方式の Nd:YAG レーザで構成されている²⁹⁾。Nd:YAG の励起は波長 808 nm のレーザダイオードを用いた end pump 方式 (Nd:YAG 結晶端面から光励起を行う方式) で、発振した 1064/1319 nm パルスレーザを非線形光学結晶 LiB_3O_5 で和周波の 589 nm 光を発生させる。レーザ出力は 4 mJ/pulse で従来の Na ライダーよりも弱いですが、射出周波数が 1000 Hz と高繰り返しが実現できるため、Na ライダーとしては最高出力の 4 W を実現している。本ライダーは、高出力であることを生かし、鉛直方向を含む東西南北 5 方向の固定観測で温度/風速の空間分布の

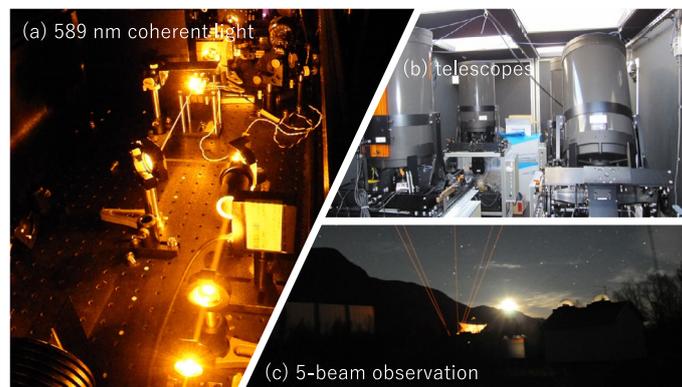


Fig. 3 Pictures of (a) 589 nm coherent light generated from Nd:YAG pulse lasers at 1064 and 1319 nm. (b) Telescopes directed to 5 directions to measure spatial dependence of mesopause temperature and wind velocities. (c) Five laser beam observation.

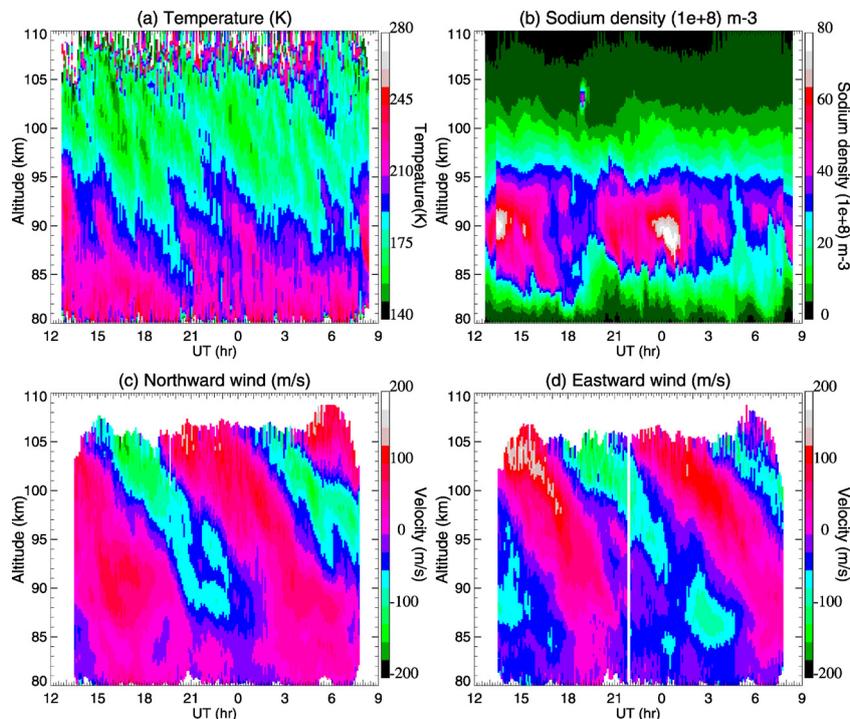


Fig. 4 Observational results of the sodium lidar on December 18, 2018. The altitude and time resolution are 1 km and 6 minutes, respectively. (a) temperature, (b) sodium density, (c) northward wind, (d) eastward wind.

計測をおこなっている (Fig. 3). Injection seeding 方式とは、1064/1319 nm パルスレーザ共振器にそれぞれ狭帯域で単一波長の 1064/1319 nm の連続光種レーザ (seeder) を注入し、パルスレーザスペクトルの単一波長化と狭帯域化と波長制御を行う手法である。Seeder 光で 1064/1319 nm の和周波をとり、生成した 589 nm 光で Doppler-free スペクトルを計測している。Seeder で決める周波数がそのままパルスの 589 nm 光に反映されるのが、injection seeding の特徴である。3 周波数の切り替えは、1064 nm seeder 光路中に設置した AO 周波数シフターで行う。送信レーザは既製品ではなく極域での Na ライダー観測を想定した完全カスタムで、最も発振に影響を与えるレーザ結晶は温度精度 0.1°C で制御することで、出力と周波数を安定化させている。この固体レーザシステムにより、従来型の Na ライダーで未解決だったレーザのメンテナンスや観測の人的負担が大幅に軽減され、観測も自動化されることになり、ライダーの知識が未熟な大学院生でもトラブルがなく観測が実現できるようになった。冬季夜間の北極域で電離圏レーダとの同時観測の重要なデータが蓄積、解析されている (Fig. 4).

4. 熱圏観測・昼間観測への新手法

近年、従来考えられていた Na 層 (高度 80–110 km) よりも高高度、高度 120 km から 200 km までの下部熱圏領域に Na 原子が薄く分布していることがライダー観測により確認された^{37–38)}。(他の金属原子に関しては、Fe³⁹⁾、K^{40–41)}などについても確認されている。) このことは、Na ライダー観測領域を高度 80 km から 200 km まで拡張させ、中性温度/風速の高度分布を中間圏から下部熱圏高度まで導出できることを意味する⁴²⁾。ただし、熱圏の Na 密度は Na 層ピーク 90 km 高度の密度の 1/1000 程度 (数個/cm³) で、これまで夜間観測で問題とならなかった月や星、弱い街明りまでもが背景光ノイズとなり、信号検出が困難となる。通常の夜間観測では市販の干渉フィルタ (半値幅~1 nm) の性能で十分であるが、微弱光検出のためには夜間観測では超狭帯域フィルタが必要となる⁴²⁾。そのフィルタが、コロラド州立大学が昼間観測に用いていた磁気光学フィルタの Faraday filter (半値幅~0.01 nm) である。

Faraday filter は、偏光面を直交配置した偏光プリズムの間に強磁場空間を作り、そこに加熱 Na セルを配置するフィルタである⁴³⁾。セルを通過する光のうち、ゼーマン効果とファラデー回転の磁気光学効果を利用し NaD₂ 線のみを選択的に透過させる。大きな特徴は、透過特性が絶対波長で厳密に決まること、それが半値幅~0.01 nm の超狭帯域であること、高透過率 (>90%) であることである。透過率シミュレーションの結果を Fig. 5 に示す。

Faraday filter は、加熱によりセル内で生成する蒸気状態の Na 原子密度が変化すると、その透過特性が大きく変わるという特徴がある。また、透過特性が超微細構造をもつため、夜観測用のバンドパスフィルタとは異なり、3 周波数観測で受信光強度の周波数依存性が出てしまう (Fig. 5 の縦線)。このため、精密なフィルタ特性計測と観測時の安定性が絶対的必要条件となる。しかし現在構築できる Faraday filter では、Na セ

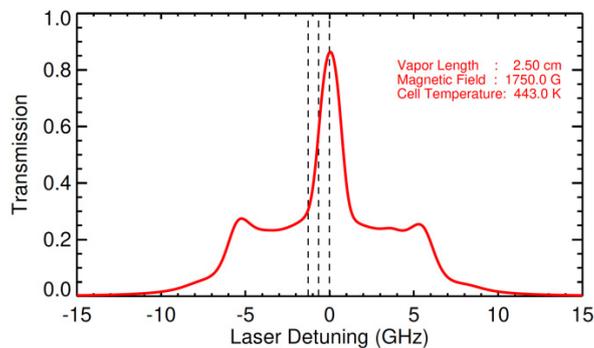


Fig. 5 Faraday filter transmission calculated at the condition of a cell length = 2.5 cm, magnetic field = 1750 Gauss, and cell temperature = 273 K (170 C). Dashed vertical lines indicate the three frequencies used at the lidar observation.

ルを使用温度である 150℃ 以上の高温で一定温度に保っても、セル材質のガラスと高温 Na 原子との化学反応により透過特性が時々刻々と変化するという致命的な欠点がある。コロラド州立大学では Faraday filter の安定条件を見つけつつ、観測前後で多大な労力をかけて安定性の検証を行っていた。しかしそもそも、市販の Na セルがガラス製である以上、程度の差こそあれこの化学反応は避けられず、北極観測での安定運用は極めて難しい。そこで我々は、化学的に活性な高温 Na 原子に対して耐性のある単結晶サファイアをセル材質として検討、工業的に最新技術を応用した Na セル製作方法の検討、透過特性計測による安定性の検証という観点から、Faraday filter 観測のための新 Na セルの独自開発を開始した。この研究は 2021 年度から 5 年間、科学研究費補助金（基盤(A)）の助成を受けている。新たな冷凍コンテナを観測所にもう 1 台設置し、Faraday filter を組み込んだ受信系で実証試験を行う。Na ライダー観測は、現在は受信系において進化している。

以上をまとめると、Tromsø の Na ライダーの受信系に Faraday filter を組み込むことで、夜間観測を下部熱圏領域（80–200 km）に発展させる。また、Tromsø は高緯度に位置するため、現在の夜間観測＝冬季観測を Faraday filter の導入で夏季・昼間へ発展させる（すなわち年間観測）ことができる。2023 年には、Tromsø で EISCAT_3D レーダー（電離圏 3 次元観測可能な次世代レーダー：総予算 100 億円以上）が国際共同のもと稼働開始予定である。この EISCAT_3D レーダーに時期を合わせ Na ライダーの新しい観測技術を確立することで、極域中間圏・下部熱圏領域の中性大気・電離大気相互作用の研究に今後も大きな貢献していく。

5. まとめ

本論文は、Na ライダーの観測技術の進化を精密観測手法の観点から報告した。Na 観測が行われて半世紀の間、Na ライダーは共鳴散乱ライダーの観測技術を牽引してきたのは間違いない。この流れは他の金属原子の共鳴散乱ライダーにも発展させられる⁴⁴⁾。北極域での安定運用に関しては取得した質の高い温度/風速データを用いて、IS (Incoherent Scatter) レーダーとの同時観測や国際共同研究により、今後も学術的成果を出していく⁴⁵⁻⁴⁶⁾。なお、Na を含む大気中の原子、分子のライダー観測の基礎と応用に関しては、2022 年に発売となった She 教授の著書を参考にされたい⁴⁷⁾。

謝辞

まず最初に、本稿の主著者から共著者の方々に深く感謝と敬意の意を示したいと思います。北極ライダーの構想、設計・開発から、現在も続く維持・運用・成果創出、Faraday filter 受信系の開発に関しては、共著者の方々の個々の高い専門性に加え、並々ならぬ努力と良好なチームワーク無くしては決して実現できませんでした。信州大学の野村彰夫教授（当時）には、主著者が信州大学着任当時から寛容な視点で南極ライダー開発を任せていただき、さらに昭和基地越冬と 3 年間の渡米の機会を与えていただきました。京都大学の中村卓司准教授（当時）（現国立極地研究所所長）には、南極から持ち帰った Na ライダーを京都大学の施設に設置させていただき、Na ライダーのみならず国内のライダー研究を大きく発展させる多大なる支援をしていただきました。コロラド州立大学の C.-Y. She 教授（当時）と D. A. Krueger 教授（当時）には、観測・解析・議論を通じて Na ライダーの深い知識を与えていただきました。誠実で親しみやすい人柄と人間的魅力とが、人としても研究者としても周りの人から支援と信頼を受ける重要な要素であることを学びました。イリノイ大学の C. S. Gardner 教授（当時）にも南極データ解析で大変お世話になりました。本質を突いた素晴らしい（格好いい）プレゼンテーションは、学ぶべきことばかりでした。この場をお借りしまして、皆様に深く深く感謝したいと思います。

本稿で紹介した Na ライダーに関連する研究活動は、日本学術振興会科学研究費助成事業（JP24310010, JP17H02968, JP21H04516, JP21H01144）、名古屋大学の ISEE 国際共同研究の支援を受けて実施している。

引用文献

- 1) C. S. Gardner, "Performance capabilities of middle-atmosphere temperature lidars: comparison of Na, Fe, K, Ca, Ca⁺, and Rayleigh systems," *Appl. Opt.*, **43**, 4941–4956 (2004).
- 2) M. R. Bowman, A. J. Gibson, and M. C. W. Sanford, "Atmospheric sodium measured by a tuned laser radar," *Nature*, **221**, 456–457 (1969).

- 3) C.-Y. She, and J. R. Yu, "Simultaneous three-frequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region," *Geophys. Res. Lett.*, **21** (17), 1771-1774 (1994).
- 4) A. J. Gibson, L. Thomas, and S. K. Bhattachacharyya, "Laser observations of the ground-state hyperfine structure of sodium and of temperatures in the upper atmosphere," *Nature*, **281**, 131-132 (1979).
- 5) R. D. Hake, Jr., E. K. Proctor, R. A. Long, "Tunable Dye Lidar techniques for measurement of atmospheric constituents, Proceedings of the SPIE," **27**, 17-24 (1972).
- 6) E. S. Richter, J. R. Rowlett, C. S. Gardner and C. F. Sechrist, Jr., "Lidar observation of the mesospheric sodium layer over Urbana, Illinois," *J. Atmos. Terr. Physics*, **43**, 327-337 (1981).
- 7) T. Aruga, H. Kamiyama, M. Jyumonji, T. Kobayashi, and H. Inaba, "Laser radar observation of the sodium layer in the upper atmosphere," Report of Ionosphere and Space Research in Japan, **28** (1), 65-68 (1974).
- 8) B. R. Clemesha, V. W. J. H. Kirchhoff, D. M. Simonich, H. Takahashi, and P. P. Batista, "Spaced lidar and nightglow observations of an atmospheric sodium enhancement," *J. Geophys. Res.*, **85** (A7), 3480-3484 (1980).
- 9) L. Thomas, A. J. Gibson, and S. K. Bhattacharyya, "Lidar observations of a horizontal variation in the atmospheric sodium layer," *J. Atmos. Terrest. Phys.*, **39**, 1405-1409 (1977).
- 10) 上山 弘, "ライダによる超高層大気観測," 気象研究ノート, 日本気象学会誌, **116**, 115-124 (1973).
- 11) A. Nomura, T. Kano, Y. Iwasaka, H. Fukunishi T. Hirasawa, and S. Kawaguchi, "Lidar observations of the mesospheric sodium layer at Syowa Station, Antarctica," *Geophys. Res. Lett.*, **14** (7), 700-703 (1987).
- 12) T. Ogawa, T. Tanaka, K. Igarashi, and A. Nomura, "Simultaneous measurements of Antarctic mesospheric gravity waves by meteor radar and lidar," *J. Geomag. Geoelectricity*, **41** (10), 835-849 (1989).
- 13) R. L. Collins, A. Nomura, and C. S. Gardner, "Gravity waves in the upper mesosphere over Antarctica: Lidar observations at the South Pole and Syowa," *J. Geophys. Res.*, **99** (D3), 5475-5486 (1994).
- 14) C. Nagasawa and M. Abo, "Lidar observations of a lot of sporadic sodium layers in mid-latitude," *Geophys. Res. Lett.*, **22** (3), 263-266 (1995).
- 15) K. Kobayashi, T. Kitahara, T. D. Kawahara, Y. Saito, A. Nomura, T. Nakamura, T. Tsuda, M. Abo, C. Nagasawa, and M. Tsutsumi, "Simultaneous measurements of dynamical structure in the mesopause region with lidars and MU radar," *Earth, Planets and Space*, **51**, 731-739 (1999).
- 16) H. Miyagawa, T. Nakamura, T. Tsuda, M. Abo, C. Nagasawa, T. D. Kawahara, K. Kobayashi, T. Kitahara, and A. Nomura, "Observations of mesospheric sporadic sodium layers with the MU radar and sodium lidars, *Earth, Planets and Space*," **51**, 785-797 (1999).
- 17) T. Tsuda, T. Nakamura, A. Nomura, T. D. Kawahara, C. Nagasawa, M. Abo, S. Okano, M. Taguchi, and M. Ejiri, "Coordinated Observations of the Mesopause Region with Radar and Optical Techniques," *Advances in Space Research*, **26** (6), 907-916 (2000).
- 18) D. A. Krueger, C.-Y. She, and T. Yuan, "Retrieving mesopause temperature and line-of-sight wind from full-diurnal-cycle Na lidar observations," *Appl. Opt.*, **54** (32), 9469-9489 (2015).
- 19) K. H. Fricke and U. von Zahn, "Mesopause temperature derived from probing the hyperfine structure of the D2 resonance line of sodium by lidar," *J. Atmos. Terr. Phys.*, **47**, 499-512 (1985).
- 20) C.-Y. She, J. R. Yu, H. Latifi and R. E. Bills, "High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesospheric sodium temperature measurements," *Appl. Opt.*, **31** (12), 2095-2106 (1992).
- 21) R. E. Bills, "Iron and sodium Doppler/temperature lidar studies of the upper mesosphere," Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign (1991).
- 22) C.-Y. She and J. R. Yu, "Doppler-free saturation fluorescence spectroscopy of Na atoms for atmospheric application," *Appl. Opt.*, **34** (6), 1063 (1995).
- 23) R. E. Bills, C. S. Gardner and C.-Y. She, "Narrowband lidar technique for sodium temperature and Doppler wind observations of the upper atmosphere," *Opt. Eng.*, **30**, 13-21 (1991).
- 24) T. H. Jeys, A. A. Brailove and A. Mooradian, "Sum frequency generation of sodium resonance radiation," *Appl. Opt.* **28** (13), 2588-2591, (1989).
- 25) T. D. Kawahara, T. Kitahara, F. Kobayashi, Y. Saito, and A. Nomura, "Sodium temperature lidar based on injection seeded Nd:YAG pulse lasers using a sum-frequency generation technique," *Optics Express*, **19** (4), 3553-3561 (2011).
- 26) T. D. Kawahara, T. Kitahara, F. Kobayashi, Y. Saito, A. Nomura, C.-Y. She, D. A. Krueger and M. Tsutsumi, "Wintertime mesopause temperatures observed by lidar measurements over Syowa station (69°S, 39°E), Antarctica," *Geophys. Res. Lett.*, **29** (15), CiteID 1709, DOI 10.1029/2002GL015244 (2002).
- 27) T. D. Kawahara, C. S. Gardner, and A. Nomura, "Observed temperature structure of the atmosphere above Syowa Station, Antarctica (69°S, 39°E)," *J. Geophys. Res.*, **109** (D12), CiteID D12103 (2004).
- 28) G. B. Burns, T. D. Kawahara, W. J. R. French, A. Nomura, and A. R. Klekociuk, "A comparison of hydroxyl rotational temperatures from Davis (69°S, 78°E) with sodium lidar temperatures from Syowa (69°S, 39°E)," *Geophys. Res. Lett.*, **30** (1),

- CiteID 1025, DOI 10.1029/2002GL016413 (2003).
- 29) T. D. Kawahara, S. Nozawa, N. Saito, T. Kawabata, T. T. Tsuda and S. Wada, "Sodium temperature/wind lidar based on laser-diode-pumped Nd:YAG lasers deployed at Tromsø, Norway (69.6°N, 19.2°E)," *Optics Express*, **25** (12) (2017).
 - 30) S. Nozawa, A. Brekke, S. Maeda, T. Aso, C. M. Hall, Y. Ogawa, S. C. Buchert, J. Röttinger, A. D. Richmond, R. Roble, and R. Fujii, "Mean winds, tides, and quasi-2 day wave in the polar lower thermosphere observed in European Incoherent Scatter (EISCAT) 8 day run data in November 2003," *J. Geophys. Res.*, **110** (A12), CiteID A12309 (2005).
 - 31) S. Nozawa, Y. Ogawa, A. Brekke, T. Tsuda, C. M. Hall, H. Miyaoka, J. Kurihara, T. Abe and R. Fujii, "EISCAT observational results during the DELTA campaign, Earth," *Planets and Space*, **58**, 1183–1191 (2006).
 - 32) Y. Hayano, Y. Saito, N. Saito, K. Akagawa, Y. Kamata, T. Kanzawa, T. Kurakami, N. Takato, S. Colley, M. Eldred, K. T. Michael, O. Guyon, S. Oya, M. Watanabe, M. Hattori, T. Golota, M. Dinkins, N. Kobayashi, Y. Minowa, M. Goto, N. Arimoto, S. Wada, H. Takami, and M. Iye, "Design of laser system for Subaru LGS AO," *Advancements in Adaptive Optics, Proceedings of the SPIE*, **5490**, 1088–1095 (2004).
 - 33) S. Nozawa, T. D. Kawahara, N. Saito, C. M. Hall, T. T. Tsuda, T. Kawabata, S. Wada, A. Brekke, T. Takahashi, H. Fujiwara, Y. Ogawa, and R. Fujii, "Variations of the neutral temperature and sodium density between 80 and 107 km above Tromsø during the winter of 2010–2011 by a new solid-state sodium lidar," *J. Geophys. Res.*, **119** (1), 441–451 (2014).
 - 34) T. T. Tsuda, S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. Kawabata, N. Saito, S. Wada, C. M. Hall, S. Oyama, Y. Ogawa, S. Suzuki, T. Ogawa, T. Takahashi, H. Fujiwara, R. Fujii, N. Matuura, and A. Brekke, "Fine structure of sporadic sodium layer observed with a sodium lidar at Tromsø, Norway," *Geophys. Res. Lett.*, **38** (18), CiteID L18102 (2011).
 - 35) T. Takahashi, S. Nozawa, M. Tsutsumi, C. Hall, S. Suzuki, T. T. Tsuda, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Oyama, S. Wada, T. Kawabata, H. Fujiwara, A. Brekke, A. Manson, C. Meek, and R. Fujii, "A case study of gravity wave dissipation in the polar MLT region using sodium LIDAR and radar data," *Annales Geophysicae*, **32** (10), 1195–1205 (2014).
 - 36) T. Takahashi, K. Hosokawa, S. Nozawa, T. T. Tsuda, Y. Ogawa, M. Tsutsumi, Y. Hiraki, H. Fujiwara, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, T. Kawabata, and C. Hall, "Depletion of mesospheric sodium during extended period of pulsating aurora," *J. Geophys. Res.*, **122** (1), 1212–1220 (2017).
 - 37) T. T. Tsuda, X. Chu, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. D. Kawahara, A. S. Yukimatu, and K. Hosokawa, "A thermospheric Na layer event observed up to 140 km over Syowa Station (69.0°S, 39.6°E) in Antarctica," *Geophys. Res. Lett.*, **42**, doi: 10.1002/2015GL064101 (2015).
 - 38) S. Gong, G. T. Yang, J. M. Wang, X. W. Cheng, F. Q. Li, and W. X. Wan, "A double sodium layer event observed over Wuhan, China by lidar," *Geophys. Res. Lett.*, **30** (5), doi: 10.1029/2002GL016135 (2003).
 - 39) X. Chu, Z. Yu, C. S. Gardner, C. Chen, and W. Fong, "Lidar observations of neutral Fe layers and fast gravity waves in the thermosphere (110–155 km) at McMurdo (77.8S, 166.7E), Antarctica," *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L23807, (2011).
 - 40) J. S. Friedman, X. Chu, C. G. M. Burn, and X. Liu, "Observation of a thermospheric descending layer of neutral K over Areibo," *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **104**, 253–259, (2013).
 - 41) J. Höffner, and J. S. Friedman, "The mesospheric metal layer topside: a possible connection to meteoroids," *Atmos. Chem. Phys.*, **4**, 801 (2004).
 - 42) A. Z. Liu, Y. Guo, F. Vargas, and G. R. Swenson, "First measurement of horizontal wind and temperature in the lower thermosphere (105–140 km) with a Na Lidar at Andes Lidar Observatory," *Geophys. Res. Lett.*, **43**, doi: 10.1002/2016GL068461 (2016).
 - 43) M. Kiefer, R. Low, J. Wrachtrup, and I. Gerhardt, "Na-Faraday rotation filtering: The optimal point," *Scientific Reports*, **4** (1), doi: 10.1038/srep06552 (2014).
 - 44) M. K. Ejiri, T. Nakamura, T. D. Kawahara, K. Tsuno, M. Abo, T. Nishiyama, T. Tsuda, S. Wada, and T. Ogawa, "Metal atom and ion layers observed by a frequency-tunable resonance scattering lidar in the midlatitude," 41st COSPAR Scientific Assembly, Turkey, Abstract id. C2.2–21–16 (2016).
 - 45) S. Mondal, S. Sarkhel, J. Agarwal, D. Chakrabarty, R. Sekar, T. Yuan, X. Cai, A. Z. Liu, S. Nozawa, N. Saito, T. D. Kawahara, M. G. Mlynczak, and J. M. Russell, "On the long lasting "C-type" structures in the sodium lidargram: The lifetime of Kelvin-Helmholtz billows in the mesosphere and lower thermosphere region," *J. Geophys. Res.*, **124** (4), 3110–3124 (2019).
 - 46) V. L. Narayanan, S. Nozawa, S. Oyama, I. Mann, K. Shiokawa, Y. Otsuka, N. Saito, S. Wada, T. D. Kawahara, and T. Takahashi, "Formation of an additional density peak in the bottom side of the sodium layer associated with the passage of multiple mesospheric frontal systems," *Atmos. Chem. Phys.*, **21** (4), 2343–2361 (2021).
 - 47) C.-Y. She and J. S. Friedman, "Atmospheric Lidar Fundamentals, Laser light scattering from atoms and linear molecules," Cambridge University Press (2022).

**川原琢也**

1995年東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士後期課程終了，博士（理学）．1995年4月から現在まで信州大学工学部．1998年南極地域観測隊でNa温度ライダーを持ち込み越冬．2001-2004年コロラド州立大学とイリノイ大学で客員研究員．帰国後，北極ライダー開発に携わる．所属学会 American Geophysical Union，地球電磁気・地球惑星圏学会，日本惑星圏学会連合，レーザー学会