

特集 ライダー観測 I

南極域における共鳴散乱ライダーを用いた
中間圏・下部熱圏観測江尻 省*^{1,2}¹ 国立極地研究所 (〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3)² 総合研究大学院大学極域科学専攻 (〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3)Observations of Antarctic mesosphere and lower-thermosphere
with resonance scattering lidarsMitsumu K. Ejiri*^{1,2}¹*National Institute of Polar Research,
10-3, Midori-cho, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518*²*The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI,
10-3, Midori-cho, Tachikawa-shi, Tokyo 190-8518*

(Received February 1, 2022; revised February 12, 2022; accepted February 15, 2022)

Metal atom and ion layers, containing such elements as Fe, Mg, Na, K, Ca, Li, originating from meteors are valuable tracers of the Earth's upper atmosphere. A resonance scattering lidar is a powerful remote sensing technique being applied to the upper atmospheric studies, which can measure the vertical distributions of temperature and wind as well as density in the metal layers. Among the observations of the mesosphere and lower thermosphere region by resonance scattering lidars, this present paper introduces the evolution and recent trends of the observations, especially those of the atmospheric phenomena peculiar to the polar regions, which have been conducted in the Antarctic region.

キーワード：共鳴散乱ライダー，中間圏・下部熱圏領域，南極

Key Words: Resonance scattering lidar, Mesosphere and lower-thermosphere region, Antarctic

1. はじめに

共鳴散乱ライダーによる中間圏・下部熱圏領域の観測では、流星由来の金属原子やイオンの基底状態と励起状態のエネルギー準位差に相当する波長の光を照射することで起こる強い共鳴散乱（共鳴蛍光）を利用して、散乱物質の密度・温度・速度を計測する¹⁾。地球に1日100トン程度飛来する流星は、高度80-120kmで大気との衝突により大半が加熱蒸発し、種々の金属元素（Fe, Mg, Na, K, Ca, Liなど）を放出する²⁾。高度80km以上では、大気密度が地上に比べて7桁以上小さく十分に希薄であるため、これらの金属元素は原子やイオンの状態で存在できる。金属原子の全球的な水平分布には未だ不明な点が多いが、各金属原子の存在比は一般的な隕石に含まれる種々の金属原子の含有比と概ね等しく、鉛直分布としては流星が加熱蒸発する高度領域（80-120km）に各金属が半値幅5-10km程度の層を形成していることが知られている。この領域の金属原子は化学的な寿命が比較的長く、中性大気と十分な衝突を繰り返しているため、共鳴散乱ライダー観測で得られる金属原子の温度・速度はこの領域の大気の温度・風速と見なせる。大気密度が希薄な中間圏・下部熱圏領域において、散乱効率の良い共鳴散乱を利用して大気の状態を表す物理量を測定可能な

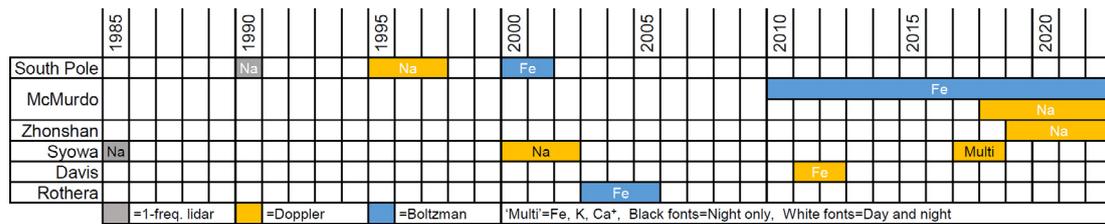


Fig. 1 Historical calendar of resonance scattering lidar observations in Antarctic.

共鳴散乱ライダーは、非常に有力な大気観測手段である^{3,4)}。

極域の中間圏・下部熱圏領域では、宇宙からの高エネルギー粒子の降り込みに対する地球大気の応答として、オーロラに代表される発光現象や化学反応を伴う大気微量成分の組成変化などが起こる。また、中間圏と熱圏の境界である中間圏界面は、地球大気の気温の鉛直分布において最も低温になる高度領域であり、冬より夏の方が低温になるという地上付近とは逆の季節変化を示す。地球上で最も低温になると言われている夏極の中間圏界面付近では、わずかに存在する水蒸気が凝結し、極中間圏雲 (Polar Mesospheric Cloud: PMC) と呼ばれる雲が形成される。共鳴散乱ライダーの観測対象となる金属原子層は、極域では、PMCの影響や、磁気嵐時のオーロラ粒子の降込みの影響を受けて、中低緯度とは異なる極域特有の変動を示す⁵⁾。本稿では、特に南極域での共鳴散乱ライダー観測について、2節でこれまでの変遷を簡単に紹介した後、3節で極域特有の大気現象についての観測研究例を中心に紹介する。

2. 南極域における共鳴散乱ライダー観測の変遷

南極域の各観測基地で行われた共鳴散乱ライダー観測を Fig. 1 と Table 1 にまとめた。南極域で初めて行われた共鳴散乱ライダー観測は、1985年に実施された第26次日本南極地域観測隊による昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) でのナトリウム (Na) 密度観測である^{6,7)}。観測に用いられた共鳴散乱ライダーは、名古屋大学が開発を主導して1983年から昭和基地で観測を実施していたエアロゾルライダー⁸⁾に、信州大学が開発を主導したフラッシュランプ励起色素レーザーを送信レーザーとして加えた共鳴散乱ライダーで、1985年4月から10月の7か月間にわたって夜間観測が実施され、南極域で初めて中間圏 Na 層の夜間変化及び秋から春にかけての季節変化が示された。1990年には米国イリノイ大学が、航空機観測用に開発したモバイル Na 共鳴散乱ライダーの受信光学系に背景光を低減するためのフィルターとして狭帯域ダブルエタロンシステムを加えて南極点 (South Pole) 基地 (90.0°S) に設置し、南極域で初めて、日照時つまり夏期間を含む通年の Na 密度観測を実現した^{9,10)}。極域中間圏温度の観測要求の高まりを受け、1999-2001年に南極点基地で固体レーザーであるアレキサンドライトレーザーを採用した鉄 (Fe) ボルツマンライダー¹¹⁾、2000-2002年に昭和基地で同じく固体レーザーである Nd:YAG レーザーを採用した Na ドップラーライダー¹²⁾を用いた中間圏温度観測が実施された^{13,14)}。共鳴散乱ドップラーライダー観測および Fe ボルツマンライダー観測の概要に

Table 1 Observation list of resonance scattering lidars at Antarctic stations.

Station	Location	Period	Metal	Laser	Method	Night/Day
South Pole	90°S	1990.04-1990.10	Na	Dye	1-freq.	N/D
		1995.01-1997.12	Na	Dye	1-freq.	N/D
		1999.12-2001.10	Fe	Alexandrite	Boltzmann	N/D
McMurdo	77.8°S, 166.7°E	2018.01-Now	Na	Dye	Doppler	N/D
		2010.12-Now	Fe	Alexandrite	Boltzmann	N/D
Zhongshan	69.4°S, 76.4°E	2019.02-Now	Na	Dye	Doppler	N/D
Syowa	69.0°S, 39.6°E	1985.04-1985.10	Na	Dye	Doppler	N
		2000.03-2002.10	Na	Nd:YAG	Doppler	N
		2017.03-2018.10	Fe, K, Ca ⁺	Alexandrite	Doppler	N
Davis	68.6°S, 78.0°E	2011.01-2012.04	Fe	Alexandrite	Doppler	N/D
Rothera	67.5°S, 68.0°W	2002.12-2005.03	Fe	Alexandrite	Boltzmann	N/D

については第3節(3.2.1, 3.2.2)を参照されたい。南極点基地のFeボルツマンライダーは、2002年にRothera基地(67.6°S, 78.1°W)に移設され、2005年まで観測を行った後、米国内でのシステム更新を経て、2011年にMcMurdo基地(77.8°S, 166.7°E)に移設され、コロラド大学の主導で今日まで観測を継続している。2011年にはDavis基地(68.6°S, 78.0°E)にも、ドイツのLeibniz-Institute of Atmospheric Physics (IAP)によってアレキサンドライトレーザーを送信レーザーとして用いたFeドップラーライダー¹⁵⁾が設置され、2012年4月までFe密度と気温の観測が行われた。NaとFe以外の金属元素の測定として、国立極地研究所主導で開発された波長可変共鳴散乱ライダー(Fig. 2)によるKとCa⁺の観測が2017年から2018年まで行われた。この波長可変共鳴散乱ライダーはアレキサンドライトレーザーの発振可能波長領域が広いことを利用して、Seeder波長を切り替えることで発振波長を変化させ、複数の金属元素(Fe, K, Ca⁺)の測定を可能にしたドップラーライダーで、日本国内での試験観測を経て^{16, 17)}、2017年1月に第58次日本南極地域観測隊によって昭和基地に設置され2018年10月まで観測を行った。McMurdo基地(77.8°S, 166.7°E)には、2018年1月にNaドップラーライダーが追加設置され、Feボルツマンライダーとの同時観測を開始している¹⁸⁾。2019年にはZhongshan基地(69.4°S, 76.4°E)に水平風も観測可能なNaドップラーライダーが設置された。天頂と天頂角30°の南と西の3方向にレーザーパルスを送信して水平風測定を行うシステムで、受信光学系に背景光を低減するためのフィルターとして超狭帯域ファラデーフィルターを採用し、密度、気温、風速の通年観測を開始している¹⁹⁾。

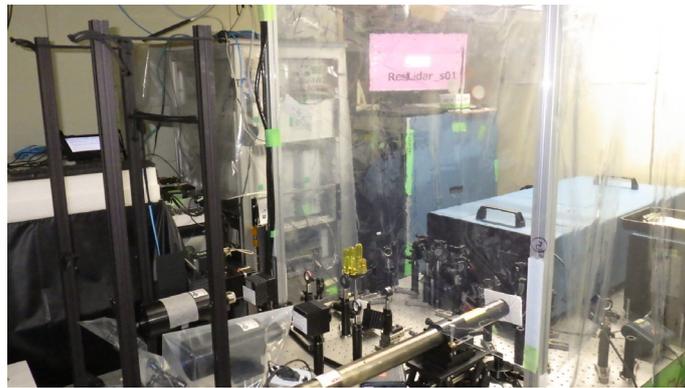


Fig. 2 The frequency-tunable resonance scattering lidar operated at Syowa Station in 2017–2018.

3. 南極域における共鳴散乱ライダー観測

3.1 金属原子密度観測

共鳴散乱ライダー観測では、対象物質からの共鳴散乱信号の強度から対象物質の密度情報を得るが、絶対値校正のために低高度(高度30–40 km付近)の大気密度を経験モデル(地上から宇宙までの地球大気の観測に基づく全地球標準大気モデル)から与え、大気分子からのレイリー散乱の信号強度で規格化する。この規格化により、観測中のレーザー光の出力変動は補正されるが、規格化に使った基準高度と金属原子層の間に雲やエアロゾルが存在する場合には追加の補正が必要になる。極域中層大気には、冬期に極成層圏雲(Polar Stratospheric Cloud: PSC)、夏期に極中間圏雲(Polar Mesospheric Cloud: PMC)が出現する。PSCの出現高度は通常30 km以下であるため、この影響を受けない。一方でPMCは金属原子層の下部にあたる高度80–85 kmで出現頻度が高いため、金属原子の共鳴散乱波長に近い別の波長でのライダー観測を同時に行い、PMCによるミー散乱信号を共鳴散乱信号から取り除く補正が必要である。

3.1.1 南極初の共鳴散乱ライダー観測～Na, K, Ca⁺密度観測は日本が開始～

南極域での世界初の共鳴散乱ライダー観測は、1985年に実施された日本南極地域観測隊による昭和基地でのNa密度観測で、4月から10月の7か月間に48晩もの観測が実施された^{6, 7)}。観測されたNa層の密度プロファイルを平均すると、Na密度のピーク高度は90.1 km、層厚は4.85 kmであり、これは1990年に南

極点基地で観測されたNa層とはほぼ同じであった。これらは北半球中低緯度（アラバマ 40°N, アレシボ 18°N）の冬のNa層と比べると2-3 km 低く、500-750 m 厚く¹⁰⁾、冬期極域中間圏で発生する強い下降流とそれに伴う温度上昇によるものとして、定性的にはある程度説明できるとされた。一方、夏を含む年間の平均プロファイルと比較すると高緯度と中緯度の差はほとんど無かった。南極点基地で1995年から改めて行われた3年間のNa密度観測と、1999年12月から2年間のFe密度観測で得られたNa層とFe層の夏期も含めた年平均密度プロファイルをアラバマでの観測結果と比較すると、各層の中心高度の差はNa層が100 m、Fe層が450 mと、南極点基地の方がわずかに高いのみだった。一方、夏期に注目すると、南極点基地上空ではNa層、Fe層共に層がほとんど無くなるほどに密度が激減していた²⁰⁾。この減少は低温とPMCによるものと推定されており、後述のPMC観測の項(3.3)で改めて詳述する。流星起源の金属原子の密度分布の情報は宇宙空間から地球大気への物質流入過程の解明のための重要な要素であるため、近年、全球大気モデルの中に種々の金属原子の化学反応を組み込み、全球分布を明らかにする試みが進められている^{2, 21-23)}。しかしながら観測結果を定量的に再現するには未だ多くの課題があり、モデルの改良にはより多くの観測データが必要とされている。NaとFe以外の金属元素については、波長可変共鳴散乱ライダー^{16, 17)}によるKとCa⁺の密度観測が2017-2018年に昭和基地で行われ、金属元素によって異なる化学過程とイオン化による密度分布の違いについて解析が進められている。

3.1.2 極域特有の金属密度変動～オーロラ粒子の降込みに対する応答～

極域では、金属原子密度を変動させる要因として、オーロラ発光を引き起こす高エネルギー粒子（オーロラ粒子）の影響も考えられる。昭和基地は統計的にオーロラの発生頻度が高い地域であるオーロラ帯に位置しており、1985年当初からオーロラ粒子降込みに対するNa層の応答が調べられ、中程度の磁気嵐が起こった際にNa層密度の総量が減少したことが報告されている^{6, 7, 24)}。当時、そのメカニズムは不明とされたが、近年北極域で行われた、ノルウェー・トロンソに設置されたNaドップラーライダーと、欧州非干渉散乱(EISCAT)ライダーによる同時観測で、オーロラ粒子降込みの指標となる電子密度の増大とNa密度減少に明瞭な一対一対応が確認されたこと²⁵⁾と、観測に基づいて見積もられたオーロラ粒子の降込みによる大気電離で増大したイオン(NO⁺, O₂⁺)の減少速度と観測されたNa密度減少速度がおおよそ一致したこと²⁶⁾から、Na原子がイオンと電荷交換してNa⁺が生成されることが、オーロラ発生時のNa密度減少の主要な要因になっていたことが示された。また、昭和基地で2000-2002年に行われたNaライダーによるNa密度観測とリオメータによる銀河雑音電波吸収(Cosmic Noise Absorption: CNA)観測の3年分の同時観測データの比較解析では、オーロラ粒子の降込みに伴うCNA変動とNa密度変動に明らかな反相関が見られ、オーロラ粒子の降込みにより地球大気が電離して電子密度が増えると、Na密度が減少することが統計的に確認された²⁷⁾。Na以外の金属原子のオーロラ粒子降込みに対する応答は未だ解明されていない。

3.2 中層・超高層大気温度観測

共鳴散乱ライダーで中間圏温度を測定する手法として、金属原子の共鳴線スペクトル形状の温度依存性(ドップラー広がり)を利用する共鳴散乱ドップラーライダーと、Fe原子の2つの共鳴線(372 nm, 374 nm)の散乱光の強度比が温度依存することを利用するFeボルツマンライダーの2つの手法が用いられている¹⁾。

3.2.1 共鳴散乱ドップラーライダー観測～密度・温度と同時に風速も測定可能な観測～

金属原子による共鳴散乱を利用したドップラーライダー観測では、金属原子の共鳴線スペクトル(半値全幅: 数GHz)を最低3周波数(周波数間隔: 数100 MHz)の狭線幅レーザー(半値全幅: <100 MHz)で分解計測することでスペクトルの形状と周波数シフト量、すなわち金属原子の熱運動によるドップラー広がり(温度)と視線方向の移動によるドップラーシフト(風速)を一意に決定することが出来る^{28, 29)}。送信レーザーの周波数切り替えには、種レーザー(Seeder)の周波数を音響光学素子(acousto-optic frequency shifter: AOFs)の周波数シフトや波長計のPID(Proportional-Integral-Differential Controller)制御で切り替える手法が用いられており、1台のレーザーで周波数を周期的に切り替えながら共鳴線スペクトルを計測する。一般に中間圏・下部熱圏領域の鉛直風は弱いので、鉛直風速度をゼロと仮定して2周波数でスペクトル形状を決定し、温度測定を行う2周波数法³⁰⁾もあるが、極域では「鉛直風速度ゼロ」の仮定が成り立たない場合があ

るため注意が必要である。例えば、アラスカ・ポーカーフラット (65.1°N, 147.4°W) では、下部熱圏 (~100-140 km) における地球大気発光 (大気光) をファブリペロー干渉計で観測し、大気移動によって生じる発光波長のドップラーシフト量を測定することで風速を得る観測が行われ、オーロラ発生時に非常に強い鉛直風 (>40 m/s) が観測されている³¹⁾。その発生機構や三次元分布については未だ解明されていないが、極域特有の強い熱圏鉛直風を想定した装置改良を行うことで、今後、共鳴散乱ライダーでもこの鉛直風が観測される可能性がある。

3.2.2 Fe ボルツマンライダー観測～極中間圏雲 (PMC) 存在下でも温度測定が可能な観測～

Fe ボルツマンライダーは、南極点基地で2年間^{20, 32, 33)}、Rothera 基地で3年間³⁴⁻³⁶⁾、2010年12月からはMcMurdo 基地で11年以上運用され続けている³⁷⁻⁴⁰⁾、南極域では最も実績のある温度ライダーであるが、Fe 原子の2つの共鳴線 (372 nm, 374 nm) でライダー観測をするために、それぞれ別のレーザーで発振させて送信し、別の受信光学系で受信するシステムが採用されている¹¹⁾。そのため、温度観測を行うために2台の共鳴散乱ライダーを同時に運用しなければならないという難しさがある。2波長のレーザーパルスと同じ出力で送信した場合、374 nm による共鳴散乱信号強度は372 nm に比べ1桁ほど小さいため、測定精度は374 nm の受信信号レベルに制限される。一方で、近接した波長でありながらFe に対する感度が大きく異なる2つの波長で観測を行うことは、Fe 原子層付近にPMC が出現した場合にも、PMC によるミー散乱信号を分離・除去し温度とFe 密度を測定することが出来るため、特に極域夏期中間圏の観測には有利と言える³⁶⁾。

3.2.3 大気大循環が引き起こす極域中層・超高層大気温度変動の観測

共鳴散乱ライダー観測は、エアロゾルの影響が無視できる高度30 km 以上の成層圏における大気分子からのレイリー散乱信号を利用することで大気温度 (気温) の測定が可能である。つまり、共鳴散乱ライダー観測にレイリーライダー観測を組み合わせることで、上部成層圏・中間圏・下部熱圏にわたる中層・超高層大気の広い高度領域をカバーする気温測定が可能なのである。南極点基地での1999年12月から2年間のFe ボルツマンライダー観測³²⁾と、同時期に昭和基地で行われたNa ドップラーライダー観測¹⁴⁾は、南極域の高度30-110 km の気温分布の季節変化を明らかにした。特に冬期中層大気 (成層圏・中間圏) については、南極点基地上空は大気モデル (MSIS-00, TIME-GCM) による予測値に比べて20-30 K も低温で、昭和基地上空は北極域の同緯度での観測値より約20 K 低温であることが示され、中間圏の子午面循環における大気重力波の強制力が予想より弱い可能性が指摘されている。

3.3 極中間圏雲の観測～南北半球での違いの原因を解明～

地球上で最も低温になる極域夏の中間圏界面付近では、わずかに存在する水蒸気が凝結し、極中間圏雲 (Polar Mesospheric Cloud: PMC) と呼ばれる雲が発生する。夏至を挟んだ前後約1か月の間、南極点基地、Rothera 基地、McMurdo 基地では高度80-85 km にしばしばPMC が観測されている³³⁻³⁷⁾。Fe ボルツマンライダーによるFe 密度、気温、PMC の同時観測は、PMC 発生高度では低温かつFe 密度が極めて低くなっていることを明瞭に示し³⁶⁾、極低温下ではPMC 形成が促進され、PMC を介した不均一反応と分子化学反応によるFe 原子の除去が促進されるとした理論研究^{38, 39)}に観測的根拠を与えた。また、北極域でのPMC 観測と比較し、PMC 発生高度は南極点基地で最も高く、同緯度であれば南極域の方が北極域より約1 km 高いことを示した^{34, 35, 37)}。このPMC 発生高度の南北半球差は、南極域の夏の中間圏界面が北極より高高度にあることを示している。中間圏界面の温度や高度を決める要因として大気重力波を含む大気波動の影響も考えられるが、大気波動活動度は年による差異が大きいものに対して、PMC の平均発生高度は観測年によらず常に南極域の方が高いことから、地球公転軌道の離心率に依存した夏期に受ける太陽放射量の南北半球差 (北半球より南半球の方が多) が主な原因と結論された^{33, 37)}。

3.4 南極-北極間の大気大循環を駆動する「大気波動」の詳細観測

地球大気最上部の大循環である中間圏の子午面循環の駆動源とされている大気重力波は、主に下層で発生し、中層大気中を伝搬して上層に運動量を輸送する。極域は、夏は中間圏子午面循環の起点になり、冬は終

点になる領域である。また、中低緯度に比べて大気潮汐波の振幅が小さく、大気重力波の寄与が相対的に大きくなる領域でもあり、ライダーだけでなくラジオゾンデや大気レーザー、大気光イメージャなど様々な測器を駆使した大気重力波の観測研究が盛んである。共鳴散乱ライダーで観測される金属原子密度の高度分布は大気重力波によっても変動するため、この変動成分を抽出してスペクトル解析することで、大気重力波の鉛直パラメータおよび活動度を調べることが出来る^{9, 10, 24)}。ただし、金属原子密度はオーロラ粒子の降込みに伴う電荷交換反応や他の大気微量成分との化学反応によって化合物やイオンに変化すると共鳴散乱ライダーでは観測されなくなるため、金属原子密度変動を利用して大気重力波解析を行う場合には化学変化を考慮した解析と、慎重な議論が必要になる。一方、気温の高度分布とその時間変動から大気重力波成分を抽出して解析する場合、上部成層圏から下部熱圏までの広い高度領域（高度約 30–110 km）の気温測定が高い時間高度分解能で可能な共鳴散乱ライダー観測は非常に有効である^{40–42)}。例えば、2011 年 1 月から 2012 年 4 月に Davis 基地で行われた Fe ドップラーライダー観測では、気温の変動成分から見積もられる大気重力波のポテンシャルエネルギー密度が成層圏と中間圏でそれぞれどのような季節変化を示すかが調査され、下層で発生した大気重力波が、冬と夏は成層圏を通過して中間圏まで伝搬するのに対して、春と秋は背景風によるフィルタリング効果が成層圏で強く働き、中間圏まで伝搬する大気重力波が減少することが示された⁴¹⁾。このように共鳴散乱ライダーによる広い高度範囲での気温観測は、大気重力波を介した大気の上下結合を議論する上で非常に有用である。最近、高精度化した気象再解析データや大気モデルによって、成層圏と中間圏の大気重力波の波源の違いや、中層大気中での碎波とそれに伴う二次波・三次波の生成など、より複雑な上下結合過程が示唆されており^{43–45)}、これらを確認するためにもより長期間、多地点での観測が求められている。

3.5 熱圏金属原子層観測～大気観測が困難な高度領域の観測「熱圏観測」への挑戦～

McMurdo 基地で Fe ボルツマンライダー観測が始まった最初の冬（2011 年 5 月 28 日）に、通常の Fe 原子層よりもはるかに高い熱圏高度（最高 155 km）から時間とともに下降する Fe 原子層が確認された⁴⁶⁾。この報告を受けて再解析された昭和基地での Na ドップラーライダー観測でも 2000 年 9 月 23 日に高度 140 km に達する Na 原子層（Fig. 3 参照）が観測されていたことが確認された⁴⁷⁾。流星による供給高度（<120 km）よりも高い高度に金属原子が存在するためには、熱圏内で金属原子が上方に輸送される必要がある。Fe 原子・イオンの化学反応や極域電場を考慮した「熱圏電離圏 Fe/Fe⁺ (TIFe) モデル」によるシミュレーションにより、磁気嵐時に発生する強い極域電場によって金属イオンが熱圏上部まで持ち上げられ、電荷移行反応で中性化した金属原子が大気波動によって下方に輸送されるという、熱圏全体を巡るような大規模な鉛直輸送が提案された⁴⁸⁾。一方で、同様の下部熱圏金属原子層の存在は、南極に限らず世界各国で、また様々な

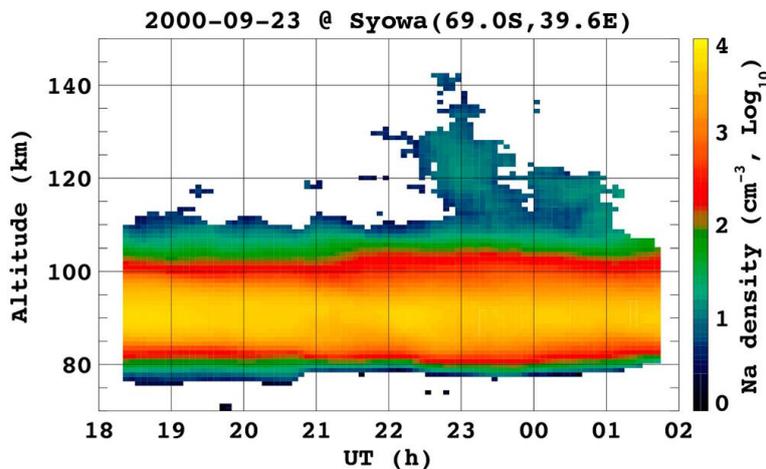


Fig. 3 Temporal variation of Na number density profile observed at Syowa Station from 18:00 UT on 23 September to 02:00 UT on 24 September 2000⁴⁷⁾. A thermospheric metal layer reached at 140 km altitude is clearly recognized.

金属原子について報告されており、極域における強い電場だけでは説明が出来ず、謎が深まっている。熱圏における金属原子の鉛直輸送過程については不明な点が多々残されているが、熱圏高度に分布する金属原子層の存在は、従来観測が困難であった熱圏領域への観測高度の拡張という点においても重要な意義を有している。例えば、アンデス (30.3°S, 70.7°W) の Na ドップラーライダー観測の例では、高度 140 km までの温度・風速の観測に成功している⁴⁹⁾。通常の金属原子層に比べて 1-2 桁以上密度の低い熱圏金属原子層からの微弱な散乱信号をより多く捉えるために、受信光学系の設計や解析手法を改良し^{50, 51)}、複数の熱圏金属原子層を同時に観測する挑戦も始まっている¹⁹⁾。

4. まとめと今後の展望

本稿では、共鳴散乱ライダーによる中間圏・下部熱圏領域の観測のうち、特に南極域で行われてきた極域特有の大気現象についての観測研究を中心に、これまでの変遷と最近の動向を紹介した。レーザー技術の発展により、金属原子層の密度変動だけでなく、気温や風速の観測も行われるようになった。また受信光学系の狭帯域化により日照時の観測も可能になり、白夜期間のある極域においては、夏期を含む通年観測の実現につながった。夏期の極域中間圏の特徴である極低温の中間圏界面とそれに伴って発生する PMC の多点での観測は、南極と北極の違いを明らかにし、中間圏子午面循環の解明につながる観測的知見が得られてきた。さらに、熱圏金属原子層が確認されたことで、観測領域拡張への期待が高まると共に、中間圏と熱圏をつなぐ鉛直物質輸送やそれに伴う中性大気と電離大気の結合過程など、地球近傍宇宙空間への遷移領域ならではの課題に共鳴散乱ライダー観測の適用範囲が広がりを見せている。今後は、熱圏高度の観測をより確実なものにするためにライダーの受信感度を上げることと並行して、中性原子だけでなく原子イオンも観測対象に加え、中性大気と電離大気の両方の視点から観測研究を進めることが重要である。

地上からの共鳴散乱ライダー観測はその可否が天候に左右される宿命を負っている。晴天率の良い拠点で観測することが望ましいが、南極の場合、設置場所を選ぶためには、システムの小型省力化と観測の自動化が必須となる。極夜(日照の無い期間)があり、かつ低温になる南極で共鳴散乱ライダーの無人拠点をすることは一朝一夕には難しいが、それを目指したシステム開発は、観測の長期安定化の実現につながり、更には天候に左右されること無く、かつグローバルな観測が可能な宇宙機搭載ライダーの開発にも応用できる技術となるだろう。

謝辞

本稿執筆に際して貴重なご意見をいただきました国立極地研究所所長中村卓司先生、電気通信大学大学院情報理工学系研究科准教授津田卓雄先生に深く感謝致します。波長可変共鳴散乱ライダーの開発および観測研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業(24740335, 15K13575, 21K18315)、日本南極地域観測事業(重点研究観測: AJ1, AJ0901)、国立極地研究所プロジェクト研究(KP3, KP301)の支援を受けている。

引用文献

- 1) X. Chu, and G. C. Papan: Resonance fluorescence lidar for measurements in the middle and upper atmosphere, in T. Fujii & T. Fukuchi (Eds.), *Laser Remote Sensing* (179-432), Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
- 2) J. M. C. Plane, W. Feng, and E. C. M. Dawkins: The Mesosphere and Metals: Chemistry and Changes, *Chem. Rev.*, **115**, 4497-4541, 10.1021/cr500501m, 2015.
- 3) M. K. Ejiri, and T. Nakamura: Upper atmosphere observations by resonance scatter lidars, *Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, **136** (8), 538-541, <https://doi.org/10.1541/ieejjournal.136.538>, 2016.
- 4) T. T. Tsuda, S. Nozawa, N. Saito, T. D. Kawahara, T. Kawabata, T. Takahashi, S. Wada, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, K. Tsuno, and M. Abo: Observations of metallic layers in the Earth's upper atmosphere based on resonance-scattering lidars, *The review of laser engineering*, **48**, 580-584, 2020.
- 5) 河村公隆, 大島慶一郎, 小達恒夫, 川村賢二, 佐崎元, 杉山慎, 関宰, 高橋晃周, 西岡純, 原登志彦, 福井学, 藤吉康志, 三寺史夫, 宮崎雄三, 本山秀明, 渡部直樹(編集): 「低温環境の科学辞典」第1章 超高層・中層大気, 朝倉書店, 2016
- 6) 野村彰夫: 南極におけるライダー観測, *レーザー研究*, **15**, 4, 192-203, <https://doi.org/10.2184/laj.15.192>, 1987.
- 7) A. Nomura, T. Kano, Y. Iwasaka, H. Fukunishi, T. Hirasawa, and S. Kawaguchi: Lidar observations of the mesospheric sodium layer at Syowa Station, *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 700-703, 1987.

- 8) 岩坂泰信, 平澤威男, 福西 浩, 藤井良一, 宮岡 宏, 伊藤昇司, 安田 升, 大谷博康: 南極中層大気探査用レーザレーダのシステム構成, 南極資料, **80**, 1–13, <http://doi.org/10.15094/00008379>, 1983.
- 9) R. L. Collins, D. C. Senft, and C. S. Gardner: Observations of a 12 h wave in the mesopause region at the South Pole, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 57–60, <https://doi.org/10.1029/91GL02780>, 1992.
- 10) 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**, 5475–5485, <https://doi.org/10.1029/93JD03276>, 1994.
- 11) X. Chu, W. Pan, G. C. Papen, C. S. Gardner, and J. A. Gelbwachs: Fe Boltzmann temperature lidar: Design, error analysis, and initial results at the North and South Poles, *Appl. Opt.*, **41**, 4400–4410, 2002.
- 12) 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.
- 13) C. S. Gardner, G. C. Papen, X. Chu, and W. Pan: First lidar observations of middle atmosphere temperatures, Fe densities, and polar mesospheric clouds over the North and South Poles, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1199–1202, 2001.
- 14) T. D. Kawahara, C. S. Gardner, and A. Nomura: Observed temperature structure of the atmosphere above Syowa Station, Antarctica (69S, 39E), *J. Geophys. Res.*, **109**, D12103, doi: 10.1029/2003JD003918, 2004.
- 15) J. Höffner, and J. Lautenbach: Daylight measurements of mesopause temperature and vertical wind with the mobile scanning iron lidar, *Opt. Lett.*, **34**, 1351–1353, 2009.
- 16) M. K. Ejiri, T. Nakamura, T. T. Tsuda, T. Nishiyama, M. Abo, T. Takahashi, K. Tsuno, T. D. Kawahara, T. Ogawa, and S. Wada: Vertical fine structure and time evolution of plasma irregularities in the E-s layer observed by a high-resolution Ca⁺ lidar, *Earth Planets Space* **71**, doi: 10.1186/s40623-019-0984-z, 2019.
- 17) M. K. Ejiri, T. Nakamura, T. T. Tsuda, T. Nishiyama, M. Abo, C.-Y. She, M. Nishioka, A. Saito, T. Takahashi, K. Tsuno, T. D. Kawahara, T. Ogawa, and S. Wada: Observation of synchronization between instabilities of the sporadic E layer and geomagnetic field line connected F region medium-scale traveling ionospheric disturbances, *J. Geophys. Res. Space Physics* **124**, 6, 4627–4638, doi:10.1029/2018JA026242, 2019.
- 18) X. Chen, W. Huang, C. Ban, M. J. Kosch, D. J. Murphy, Z. Hu, J. Liu, F. He, R. Wang, H. Yang, and H. Hu: Dynamic properties of a sporadic sodium layer revealed by observations over Zhongshan, Antarctica: A case study. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **126**, e2021JA029787. <https://doi.org/10.1029/2021JA029787>, 2021.
- 19) X. Chu, Y. Nishimura, Z. Xu, Z. Yu, J. M. C. Plane, C. S. Gardner, and Y. Ogawa: First simultaneous lidar observations of thermosphere ionosphere Fe and Na (TIFe and TINa) layers at McMurdo (77.84°S, 166.67°E), Antarctica with concurrent measurements of aurora activity, enhanced ionization layers, and converging electric field. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL090181. <https://doi.org/10.1029/2020GL090181>, 2020.
- 20) C. S. Gardner, J. M. C. Plane, W. Pan, T. Vondra, B. J. Murray, and X. Chu: Seasonal variations of the Na and Fe layers at the South Pole and their implications for the chemistry and general circulation of the polar mesosphere, *J. Geophys. Res.*, **110**, D10302, doi: 10.1029/2004JD005670, 2005.
- 21) D. R. Marsh, D. Janches, W. Feng, and J. M. C. Plane: A global model of meteoric sodium, *J. Geophys. Res.*, **118**, 11, 442–20 411, 452, 10.1002/jgrd. 50870, 2013.
- 22) W. Feng, D. R. Marsh, M. P. Chipperfield, D. Janches, J. Höffner, F. Yi, and J. M. C. Plane: A global atmospheric model of meteoric iron, *J. Geophys. Res.*, **118**, 9456–9474, 10.1002/jgrd. 50708, 2013.
- 23) J. M. C. Plane, W. Feng, J. C. Gómez Martín, M. Gerding, and S. Raizada: A new model of meteoric calcium in the mesosphere and lower thermosphere., *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 14799–14811, 10.5194/acp-2018-493, 2018
- 24) T. Ogawa, A. Nomura, T. Tanaka, and K. Igarashi: Simultaneous measurements of Antarctic mesospheric gravity waves by meteor radar and Lidar, *J. Geomag. Geoelectr.*, **41**, 835–849, 1989.
- 25) T. T. Tsuda, S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. Kawabata, N. Saito, S. Wada, Y. Ogawa, S. Oyama, C. M. Hall, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, S. Suzuki, T. Takahashi, and T. Nakamura: Decrease in sodium density observed during auroral particle precipitation over Tromsø, Norway, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4486–4490, doi: 10.1002/grl. 50897, 2013.
- 26) 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. Space Physics*, **122**, 1212–1220, doi: 10.1002/2016JA023472, 2017.
- 27) T. T. Tsuda, Y.-M. Tanaka, R. Tozu, K. Takizawa, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, T. D. Kawahara, and T. Nakamura: Relationship between Na layer and CNA variations observed at Syowa, Antarctic, *Earth Planets Space*, **73**, 7, doi: 10.1186/s40623-020-01335-7, 2021.
- 28) 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, 10.1029/94GL01417, 1994.
- 29) U. von Zahn, and J. Höffner: Mesopause temperature profiling by potassium lidar, *Geophys. Res. Lett.* **23** (2), 141–144, 10.1029/95GL03688, 1996.
- 30) C.-Y. She, H. Latifi, J. R. Yu, R. J. Alvarez II, R. E. Bills, and C. S. Gardner: Two-frequency lidar technique for mesospheric

- Na temperature measurements, *Geophys. Res. Lett.* **17**, 929–932, 10.1029/GL017i007p00929, 1990.
- 31) G. D. Price, R. W. Smith, and G. Hernandez: Simultaneous measurements of large vertical winds in the upper and lower thermosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **53**, 631–643, 1995.
 - 32) W. Pan, and C. S. Gardner: Seasonal variations of the atmospheric temperature structure at South Pole, *J. Geophys. Res.*, **108** (D18), 4564, doi: 10.1029/2002JD003217, 2003.
 - 33) X. Chu, C. S. Gardner, and R. G. Roble: Lidar studies of interannual, seasonal, and diurnal variations of polar mesospheric clouds at the South Pole, *J. Geophys. Res.*, **108** (D8), 8447, doi: 10.1029/2002JD002524, 2003.
 - 34) X. Chu, G. J. Nott, P. J. Espy, C. S. Gardner, J. C. Diettrich, M. A. Clilverd, and M. J. Jarvis: Lidar observations of polar mesospheric clouds at Rothera, Antarctica (67.5S, 68.0W), *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L02114, doi: 10.1029/2003GL018638, 2004.
 - 35) X. Chu, P. J. Espy, G. J. Nott, J. C. Diettrich, and C. S. Gardner: Polar mesospheric clouds observed by an iron Boltzmann lidar at Rothera (67.5S, 68.0W), Antarctica from 2002 to 2005: Properties and implications, *J. Geophys. Res.*, **111**, D20213, doi: 10.1029/2006JD007086, 2006.
 - 36) C. S. Gardner, X. Chu, P. J. Espy, J. M. C. Plane, D. R. Marsh, and D. Janches: Seasonal variations of the mesospheric Fe layer at Rothera, Antarctica (67.5°S, 68.0°W), *J. Geophys. Res.*, **116**, D02304, doi: 10.1029/2010JD014655, 2011.
 - 37) X. Chu, W. Huang, W. Fong, Z. Yu, Z. Wang, J. A. Smith, and C. S. Gardner: First lidar observations of polar mesospheric clouds and Fe temperatures at McMurdo (77.8°S, 166.7°E), Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L16810, doi: 10.1029/2011GL048373, 2011.
 - 38) M. Rapp, F.-J. Lübken, A. Müllemann, G. E. Thomas, and E. J. Jensen: Small-scale temperature variations in the vicinity of NLC: Experimental and model results, *J. Geophys. Res.*, **107** (D19), 4392, doi: 10.1029/2001JD001241, 2002.
 - 39) J. M. C. Plane, B. J. Murray, X. Chu, and C. S. Gardner: Removal of meteoric iron on polar mesospheric clouds, *Science*, **304**, 426–428, doi:10.1126/science. 1093236, 2004.
 - 40) X. Lu, X. Chu, W. Fong, C. Chen, Z. Yu, B. R. Roberts and A. J. McDonald: Vertical Evolution of Potential Energy Density and Vertical Wavenumber Spectrum of Antarctic Gravity Waves from 35 to 105 km at McMurdo (77.8°S, 166.7°E), *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 2719–2737, doi: 10.1002/2014JD022751, 2015.
 - 41) B. Kaifler, F.-J. Lübken, J. Hoffner, R. J. Morris, and T. P. Viehl: Lidar observations of gravity wave activity in the middle atmosphere over Davis (69°S, 78°E), Antarctica, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 4506–4521, doi: 10.1002/2014JD022879, 2015.
 - 42) C. Chen, X. Chu, J. Zhao, B. R. Roberts, Z. Yu, W. Fong, X. Lu, and J. A. Smith: Lidar observations of persistent gravity waves with periods of 3–10 h in the Antarctic middle and upper atmosphere at McMurdo (77.83°S, 166.67°E), *J. Geophys. Res. Space Physics*, **121**, 1483–1502, doi:10.1002/2015JA022127, 2016.
 - 43) S. L. Vadas, D. C. Fritts, and M. J. Alexander: Mechanism for the generation of secondary waves in wave breaking regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **60** (1), 194–214. <https://doi.org/10.1175/1520-0469>, 2003.
 - 44) S. L. Vadas, and E. Becker: Numerical modeling of the excitation, propagation, and dissipation of primary and secondary gravity waves during wintertime at McMurdo Station in the Antarctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 9326–9369. <https://doi.org/10.1029/2017JD027974>, 2018.
 - 45) S. L., Vadas, and Becker, E. : Numerical modeling of the generation of tertiary gravity waves in the mesosphere and thermosphere during strong mountain wave events over the Southern Andes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **124**, 7687–7718. <https://doi.org/10.1029/2019JA026694>, 2019.
 - 46) 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 (77.8°S, 166.7°E), Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L23807, doi: 10.1029/2011GL050016, 2011.
 - 47) 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**, 3647, 2015.
 - 48) Chu, X., and Z. Yu: Formation mechanisms of neutral Fe layers in the thermosphere at Antarctica studied with a thermosphere-ionosphere Fe/Fe⁺ (TIFe) model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, **122**, 6812–6848, doi: 10.1002/2016JA023773, 2017.
 - 49) 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**, 2374–2380, doi: 10.1002/2016GL06846, 2016.
 - 50) J. A. Smith, and X. Chu: High-efficiency receiver architecture for resonance-fluorescence and Doppler lidars. *Applied Optics*, **54** (11), 3173–3184. <https://doi.org/10.1364/AO.54.003173>, 2015.
 - 51) C. S. Gardner and X. Chu: Eliminating photon noise biases in the computation of second-order statistics of lidar temperature, wind, and species measurements, *Applied Optics*, **59**, 27, 8259–8271, <https://doi.org/10.1364/AO.400375>, 2020.

**江尻 省**

2002年名古屋大学大学院理学研究科博士課程（後期課程）素粒子宇宙物理学専攻修了。国立環境研究所でNIESポスドクフェロー，米国ユタ州立大学でCEDARポスドク，京都大学生存圏研究所で日本学術振興会特別研究員を経て，現在国立極地研究所宙空圏研究グループ助教。日本南極地域観測隊に第51次夏隊員，第58次越冬隊員として参加。大気光イメージングによる大気重力波観測，レイリー・ラマンライダー，共鳴散乱ライダーによる極域中層・超高層大気観測研究に従事。地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS），気象学会，レーザーセンシング学会，American Geophysical Union（AGU）の学会員。