

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：62611

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740335

研究課題名(和文) 大気温度計測用共鳴散乱ライダーの衛星搭載化に向けた新手法の開発

研究課題名(英文) Development of the new measurement method toward satellite-borne resonance scattering lidar for atmospheric temperature measurement

研究代表者

江尻 省 (EJIRI, Mitsumu)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：80391077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：中間圏・下部熱圏(MLT)領域の温度は、地球大気の子午面循環や、宇宙の電離大気と地球の中性大気の相互作用を理解する上で極めて重要な物理量である。共鳴散乱ライダーはこの領域の温度を高い時間・高度分解能で測定可能な唯一の測器だが、温度測定のためにはレーザー周波数を厳密に制御する必要があり、これが装置を複雑にし、設置環境や観測対象を限定的にしている。本研究では、レーザー周波数を射出前に厳密に制御する現行手法に替わって、観測対象からの共鳴散乱信号を利用して解析時に決定する新しい手法を提案・実証することで、共鳴散乱ライダー温度計測法の汎用性と適用範囲を広げると共に、飛翔体からの観測の可能性も高めた。

研究成果の概要(英文)：Temperature profiles in the mesosphere and lower-thermosphere are quite important to understand interactions between neutral atmosphere and ionospheric plasma. Resonance scattering lidar is the only instrument that can measure temperature profiles with high-time and -spatial resolutions. However, the lidar temperature measurements require tuning the laser frequencies to the resonance scatter line very strictly, and the complicated tuning systems limit observable species (atoms and ions) and an operation environment of the lidar system. In this study, we suggested a new method that the laser frequencies are estimated using received resonance scatter signals instead of the tuning laser frequencies of transmitter and verified the validity of the new method. As the results, the versatility and the coverage of temperature measurements by resonance scattering lidar are expanded and the feasibility of satellite's on-board resonance scattering lidar is indicated.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：共鳴散乱ライダー 温度測定 中間圏・下部熱圏領域 金属原子 イオン

### 1. 研究開始当初の背景

地球と宇宙の境界領域とも言われる中間圏・下部熱圏(Mesosphere – Lower Thermosphere, MLT) 領域では、流体としての振る舞いが支配的な地球の中性大気と、電磁気学的振る舞いが顕著な宇宙の電離大気の間で、エネルギーや物質の交換、様々な化学反応が活発に起こっている。これらを定量的に議論する際に鍵になる物理量が温度の鉛直分布であるが、これを高い時間・高度分解能で測定可能な測器は、現在のところ MLT 領域に存在する金属原子層を利用した共鳴散乱ライダーのみである。

金属原子共鳴散乱ライダーによる温度観測法には、ドップラー拡がりをもつ共鳴散乱線内の2周波もしくは3周波に対してレーザーを同調させて射出し、それぞれの受信信号の比から温度を導出する方法[e.g., She et al., 1990; 1991]と、10以上の周波数で共鳴散乱線全体をスキャンするように観測し、受信信号強度の周波数分布から得られる共鳴散乱線の半値幅から温度を導出する方法[von Zahn and Hoffner, 1996]がある。いずれの手法でも、温度の絶対値を数 K 以内の絶対精度で測定するには、送信レーザー周波数を厳密に(~10 MHz 以内)で制御する必要があるが、このための制御装置が非常に複雑で、製作・操作・保守が難しい。例えば、ナトリウム(Na)共鳴散乱ライダーで2周波観測を行った She et al. [1990]は、加熱した Na 原子の蒸気セルにレーザー光を往復させ、Na 原子が発する蛍光スペクトル中の特定の周波数に現れる飽和吸収スペクトル(Doppler Free)にレーザーを同調させることで、レーザー周波数を既知にした。Doppler Free は Na 以外の金属原子にも見られるが、金属原子を蒸気にしてガラスのセル中に保持することが難しく、利用できる金属原子は限られている。また、カリウム(K)共鳴散乱ライダー観測でスキャン法を採用した von Zahn and Hoffner [1996]は、ファブリ・ペロー干渉計でレーザー周波数を1ショット毎に厳密に計測し、ショット毎に微妙に異なる周波数に対応した超多チャンネル受信システムを独自に開発して、受信信号の積算を行った。すなわち、「システム(送信レーザー周波数制御、信号積算)が複雑」、「操作が難しい」、「観測対象に限られる」、といった難点が、共鳴散乱ライダーによる温度計測の汎用性や適用範囲を限定し、MLT 領域の温度観測を極端に難しいものになっている。

### 2. 研究の目的

レーザー周波数を射出前に厳密に制御する現行手法に替わって、観測対象からの共鳴散乱信号を利用して解析時に決定する新しい手法を提案し、実験観測でこの手法の妥当性を確認することにより、共鳴散乱ライダー温度計測法の汎用性と適用範囲を広げ、将来の衛星搭載化にも貢献する。

### 3. 研究の方法

本研究では、送信レーザー周波数の制御法として、金属原子の蒸気セルも超多チャンネル

受信システムも必要とせず、システムが比較的簡単な波長計を用いた制御法(波長計で種レーザーの周波数をモニターし、その周波数をフィードバック制御することで送信レーザー周波数を制御する)を採用した。MLT 領域では平均鉛直風は 0 m/s と仮定出来るため、温度と同時に視線方向の風速も測定することが出来る3周波法 [She and Yu, 1994]で鉛直上方を観測し、もし 0 m/s でない鉛直風速が観測された場合には、その原因は風速によるドップラー周波数偏移ではなく、レーザー周波数の設定値からのずれであるとして、送信レーザーの正確な周波数をデータ解析時に算出する手法を提案した。提案した新手法を実証するために、次の4項目を軸に研究を進めた。

- ① 共鳴散乱ライダーシステムのうち、受信光学系を設計、製作
- ② 波長計による送信レーザー周波数制御法の精度を確認
- ③ 温度・風速観測に用いる送信レーザー3周波数の最適な数組み合わせを検討
- ④ 実際の観測試験により新手法の妥当性、有用性を確認

#### ①受信光学系の設計、製作

共鳴散乱ライダーシステムのうち、送信レーザーとしては、国立極地研が南極地域観測事業の一環として推進する重点研究観測の中で開発されている波長可変型共鳴散乱ライダーの送信レーザー(アレキサンドライトレーザー)を利用したため、本研究では特に、図1で示した望遠鏡を含む小型の受信系(灰色ハッチ部)を製作した。共鳴散乱信号(点線)の集光には市販の天体望遠鏡を利用し、視野を絞ることと、バンドパスフ

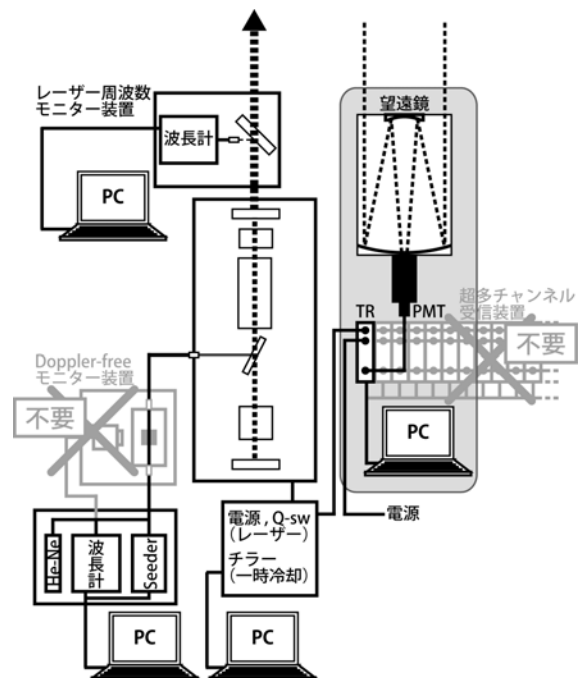


図1 共鳴散乱ライダーシステムの模式図。本研究観測では、超多チャンネル受信装置が不要な受光学系(灰色ハッチ部)を製作。

ルターを通すことで背景光を減光した。信号は、光電子増倍管 (PMT) で受信し、トランジェントレコーダーで積算した後、PC の HDD に記録する。受信光学系はレンズの焦点距離や PMT の感度の波長依存性を考慮して、近赤外線と紫外線両方に対応可能な光学系を設計し、カリウム ( $K(D_1)$ ) の共鳴散乱線 (770 nm) の他に、イオン層の観測としてカルシウムイオン ( $Ca^+$ ) の共鳴散乱線 (393 nm) 観測も出来るようにした。

## ②波長計による送信レーザー周波数制御法の精度を確認

共鳴散乱ライダー観測では、送信レーザーの周波数安定性と繰り返し精度が温度や風速の測定精度に大きく影響する。そこで、本研究で採用した波長計による送信レーザー周波数制御法の安定性と繰り返し精度についての実証試験を数ヶ月にわたって断続的に繰り返し行った。金属原子ガスの飽和吸収スペクトルを絶対基準として精度検証した結果、スペクトル間隔の再現性が 1 MHz 以内と、極めて高い精度であることが分かった。つまり、波長計によるレーザー周波数制御法でレーザー周波数のある周波数から別の周波数に切り替える場合、1 MHz 以内の精度で目的の周波数に切り替えることが可能、ということである。この周波数精度 (1 MHz 以内) は、数ヶ月の実験期間中変わらなかった。また、レーザー周波数を一つの周波数に同調させた状態で長時間運転した場合のレーザー周波数の揺らぎやシフト量 (周波数ロックの安定性) も数 MHz 以内であり、目標性能 (10 MHz) を十分に満たすことを実証的に確認した。

## ③送信レーザー3周波の最適な周波数組み合わせの検討

実際の送信レーザーの出力や受信光学系の効率等を考慮して、温度・風速観測を最も効率よく行える観測周波数を検討した。具体的には、カリウム共鳴散乱ライダー観測に用いる 3 周波の組み合わせを変えて、光電子増倍管 (PMT) のショットノイズやカリウム原子密度変動に起因する温度および風速の測定誤差 (誤差伝搬) をシミュレーションし、その周波数依存性を調べた。一例を図 2 に示す。カリウム層の温度や密度変動の仮定を様々に変えて誤差伝搬のシミュレーション結果を比較し、最適な観測周波数組み合わせを検討した。本研究で提案する送信レーザーの周波数をデータ解析時に算出する手法で、これを正確に知るためには、鉛直風速を精度良く測定することが重要になる。従って本研究では、風速の測定精度が高い 3 周波の組み合わせとして、カリウム共鳴散乱線 ( $K(D_1)$ ) の重心波長 (770.10836 nm) からの相対周波数が、-550 MHz、-180 MHz、600 MHz の 3 周波を観測試験に用いた。

## ④観測試験による新手法の妥当性、有用性の確認

波長計による周波数制御法を用いて、③で選択した 3 周波数に送信レーザー周波数を合わ

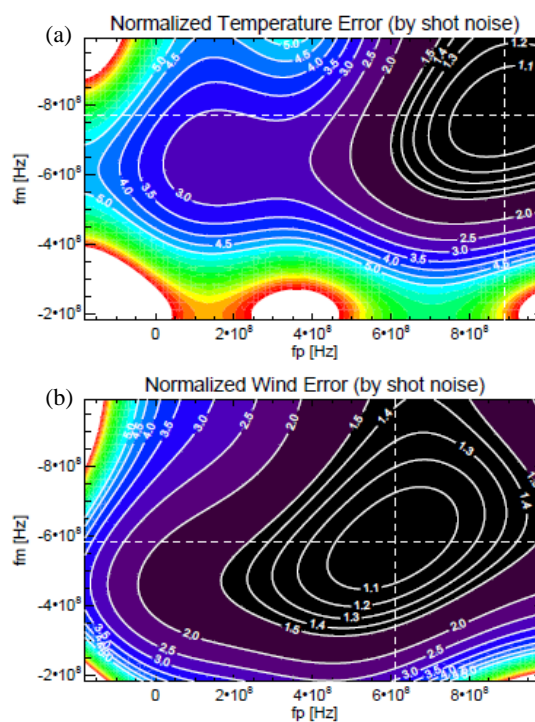


図 2 カリウム共鳴散乱ライダーによる 3 周波温度・風速観測のための最適観測周波数組み合わせの検討結果の一例 (カリウム層温度=200 K)。3 周波数のうち中央の周波数を固定して、両端の 2 周波を変えた場合のショットノイズによる温度 (a) と風速 (b) の推定誤差の周波数依存性を示している。コンターは最小値に対する比。

せ、実際にカリウム層の 3 周波温度・風速観測試験を行った。取得されたデータの解析時に、平均鉛直風速度を 0 m/s と仮定して送信レーザー周波数の校正を行い、温度、風速 (鉛直風) を導出した。一例として、2014 年 2 月 25 日に行った観測試験結果を示すと、この日の観測では、データ解析の結果、平均鉛直風速度は約 45 m/s と算出された。風速 45 m/s に相当するレーザー周波数の波長計による設定値からのずれは約 60 MHz であるため、この分だけ補正することで、送信レーザーの実際の周波数を知ること

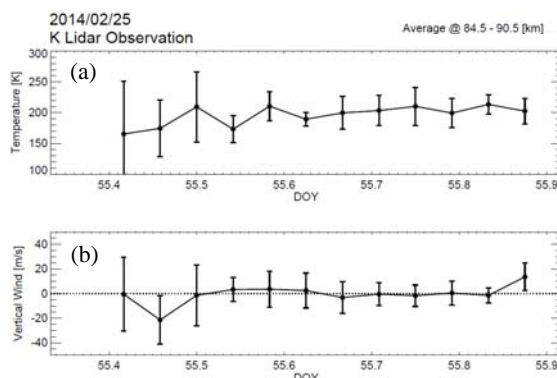


図 3 送信レーザー周波数を波長計で制御した共鳴散乱ライダーによるカリウム原子層の 3 周波温度・風速観測結果。温度 (a) と風速 (b) の時間変化を示している。積算時間、高度はそれぞれ 60 分、990 m。図中の各点は高度 84.5 - 90.5 km の平均値で、エラーバーはそのばらつき (rms) を表している。

が出来た。図3は周波数校正後に得られた温度と風速の時間変化を示している。

#### 4. 研究成果

共鳴散乱ライダーによる温度計測法の汎用性と適用範囲を広げるために、レーザー周波数を射出前に厳密に制御する現行手法に替わって、観測対象からの共鳴散乱信号を利用して解析時に決定する新しい手法を提案、これの有用性を実証した。

本手法によりレーザーの周波数制御システムを簡素化するだけでなく、発振可能な周波数範囲内で任意の周波数に調整することが出来るため、人工衛星やロケット、航空機などの飛翔体に搭載し、ライダーシステム自体が移動速度を持つような場合にも、移動速度の視線方向成分に相当するドップラーシフトを考慮して送信レーザー周波数を選ぶことが出来る。また、蒸気セルを用いた飽和吸収スペクトル測定が困難(もしくは不可能)な原子やイオンの温度観測等にも応用できるため、共鳴散乱ライダーによる観測対象の大幅な拡大も期待される。

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 15 件)

- (1) 江尻省, 津田卓雄, 西山尚典, 阿保真, 富川喜弘, 鈴木秀彦, 川原琢也, 堤雅基, 中村卓司, 第 VIII 期南極重点研究観測における高機能ライダーの現状, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜市, パシフィコ横浜, 2014 年 4 月 28 日~2014 年 5 月 2 日
- (2) Mitsumu K. Ejiri, Takuo T. Tsuda, Takanori Nishiyama, Makoto Abo, Yoshihiro Tomikawa, Hidehiko Suzuki, Takuya D. Kawahara, Masaki Tsutsumi and Takuji Nakamura, Recent observations by Rayleigh/Raman lidar and developments of tunable resonance scattering lidar system in JARE, Japan Geoscience Union Meeting 2014, Pacifico YOKOHAMA, April 28 - May 2, 2014
- (3) 津田卓雄, 江尻省, 西山尚典, 阿保真, 川原琢也, 中村卓司, 南極観測用の波長可変共鳴散乱ライダーシステム: 現況について, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜市, パシフィコ横浜, 2014 年 4 月 28 日~2014 年 5 月 2 日
- (4) 川原琢也, 津田卓雄, 西山尚典, 江尻省, 阿保真, 中村卓司, カリウム共鳴散乱ライダー用ドップラーフリー飽和吸収分光実験, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜市, パシフィコ横浜, 2014 年 4 月 28 日~2014 年 5 月 2 日
- (5) Mitsumu K. Ejiri, Takuo T. Tsuda, Takanori Nishiyama, Makoto Abo, Yoshihiro Tomikawa, Hidehiko Suzuki, Takuya D. Kawahara, Masaki Tsutsumi and Takuji Nakamura, Sub-project I members of JARE VIII-th term prioritized research project, Current status of observations by

Rayleigh/Raman lidar and developments of resonance scattering lidar in JARE VIII-th term prioritized research project, International Workshop on Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar (国立極地研究所研究集会:南極昭和基地大型大気ライダー計画(PANSY)研究集会), 文京区, 東京大学, 2014 年 3 月 10 日~2014 年 3 月 11 日.

- (6) 江尻省, 津田卓雄, 西山尚典, 阿保真, 富川喜弘, 鈴木秀彦, 川原琢也, 堤雅基, 中村卓司, 高機能ライダーの南極昭和基地での観測と国内開発の現状報告, 第 18 回大気ライダー観測研究会, 千代田区, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス, 2014 年 2 月 19 日.
- (7) 津田卓雄, 江尻省, 西山尚典, 阿保真, 川原琢也, 中村卓司, 南極昭和基地の共鳴散乱ライダーシステム: Fe 原子層の国内試験観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 134 回総会及び講演会, 高知市, 高知大学, 2013 年 11 月 2 日~2013 年 11 月 5 日
- (8) 江尻省, 津田卓雄, 西山尚典, 阿保真, 川原琢也, 中村卓司, 南極昭和基地の共鳴散乱ライダーシステム: K 原子層の国内試験観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 134 回総会及び講演会, 高知市, 高知大学, 2013 年 11 月 2 日~2013 年 11 月 5 日
- (9) Mitsumu K. Ejiri, Takuo T. Tsuda, Takanori Nishiyama, Makoto Abo, Takuji Nakamura, First results of potassium density and temperature profiles by a resonance scattering lidar for Antarctic observation, IAGA, Merida Yucatan Mexico, August 26-31, 2013
- (10)江尻省, 津田卓雄, 西山尚典, 阿保真, 川原琢也, 中村卓司, 波長可変共鳴散乱ライダーによるカリウム原子層の初期観測結果, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉市, 幕張メッセ, 2013 年 5 月 19 日~2013 年 5 月 24 日
- (11)Takuo T. Tsuda, Takuji Nakamura, Mitsumu K. Ejiri, Makoto Abo, and Takuya D. Kawahara, Resonance scattering lidar observation at Syowa Station in the Antarctic, 第 1 回南極域大気重力波イメージングネットワーク国際会議 (The first Antarctic Gravity Wave Imaging Network workshop), 立川市, 国立極地研究所, 2013 年 03 月 13 日~2013 年 03 月 15 日
- (12)江尻省, 津田卓雄, 阿保真, 川原琢也, 中村卓司, 多波長共鳴散乱ライダーによるカリウム層の観測, 第 17 回大気ライダー観測研究会, 千代田区, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス, 2013 年 03 月 07 日
- (13)江尻省, 阿保真, 津田卓雄, 松田貴嗣, 堤雅基, 富川喜弘, 中村卓司, 波長可変共鳴散乱ライダーの開発~昭和基地ライダーシステムの観測高度拡張~, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演

- 会, 札幌市, 札幌コンベンションセンター,  
2012年10月31日～2012年11月03日
- (14)江尻省, 津田卓雄, 阿保真, 松田貴嗣, 堤  
雅基, 富川喜弘, 川原卓也, 中村卓司, 鳴  
散乱ライダーの国内開発状況～昭和基地  
ライダーシステムの観測高度拡張～, 第3  
回極域科学シンポジウム, 立川市, 国立極  
地研究所, 2012年11月25日～2012年11  
月29日
- (15)江尻省, 津田卓雄, 阿保真, 松田貴嗣, 三  
浦夏美, 川原琢也, 中村卓司, 南極昭和  
基地ライダーにおける共鳴散乱観測システ  
ム2: 波長計を用いたレーザー波長の制御  
実験, 第30回レーザーセンシングシンポジウ  
ム, 小豆郡, オリビアン小豆島, 2012年09  
月06日～2012年09月07日

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

江尻 省 (EJIRI, MITSUMU)  
国立極地研究所・研究教育系・助教  
研究者番号:80391077

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし

### (4)研究協力者

中村 卓司 (NAKAMURA, TAKUJI)  
国立極地研究所・研究教育系・教授  
研究者番号:40217857

阿保 真 (ABO, MAKOTO)  
首都大学東京・システムデザイン研究科・教授  
研究者番号:20167951

津田 卓雄 (TSUDA, TAKUO)  
国立極地研究所・研究教育系・日本学術振興  
会特別研究員 (PD)  
研究者番号:90444421

西山 尚典 (NISHIYAMA, TAKANORI)  
国立極地研究所・研究教育系・特任研究員  
研究者番号:00704876

川原 琢也 (KAWAHARA, TAKUYA)  
信州大学・工学部・准教授  
研究者番号:40273073