

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 1 月 10 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20360405

研究課題名（和文） ナトリウム温度ライダーに応用するレーザー周波数の超精密制御方法の研究

研究課題名（英文） Study on the ultra-fine tuning method of a laser frequency at the sodium resonance line for the sodium lidar observation

研究代表者 川原 琢也 (KAWAHARA TAKUYA)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号：40273073

研究成果の概要（和文）：北極圏に設置する、高出力固体レーザーを用いたナトリウムライダーの周波数制御系の開発である。大気に射出するパルスレーザーの共振器に導入する（パルスの種となる）狭帯域連続光レーザーの波長を精密モニター、制御する技術の確立を行った。これをノルウェーのライダーシステムに導入し観測を行った結果、ライダーの性能を実証できるきわめて良好なデータが得られ、極域中間圏界面観測の重要なシステムが構築できた。

研究成果の概要（英文）： The purpose of this research is to establish a core technology controlling pulse laser frequency of a sodium (Na) lidar. The lidar transmitter mainly consists of two parts; Nd:YAG pulse lasers and its injection seeding system using continuous wave (cw) narrowband lasers. In this research, using 1064/1319 nm frequency controllable cw lasers, the researches concerning the injection seeder system have been done. In order to control the pulse 589 nm laser, the frequency of the absolute seed laser was monitored and precisely controlled. The validity was checked through the observation in Norway. All the system functioned very well and extremely high quality data was obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	10,500,000	3,150,000	13,650,000

研究分野：地球・資源システム工学

科研費の分科・細目：総合工学、地球・資源システム工学

キーワード：地球計測, 超高層大気, レーザ, ライダー, ナトリウム

1. 研究開始当初の背景

高度 80-110km の大気領域は中間圏界面と呼ばれ、下層から伝搬する大気波動による運動量やエネルギー輸送、宇宙から降り注ぐ流星が大気との摩擦で燃え尽き、その結果漂う金属原子層の存在、極域では磁力線を介して降り込む荷電粒子によるオーロラ現象など、

科学的に興味深い。従来、この領域の観測手法が少ない中で、ナトリウム (Na) ライダーは、数少ない地上観測装置として、1970 年代から観測に用いられてきた。レーザー技術の進歩とともに、従来 Na 密度計測しかできなかったライダーも進化し続け、1990 年代半ばには背景の大気温度や風の計測が可能と

なった。現在では中間圏界面の温度や風の絶対値を高時間高空間分解能で計測できる唯一の手法として、その存在意義を確固にしている。ただし、諸外国のライダーシステムは、システムが大型で複雑なために北半球中緯度での固定観測が主だった。

一方、国内では信州大学が 2000 年から 2002 年における南極観測用に、固体レーザー (Nd:YAG レーザ) を用いて Na 温度ライダーを開発し世界に先駆けて南極に持ち込み中間圏界面温度の観測を成功させた。固体レーザーの Na ライダーは世界初で、他国では持ち得ない技術である。この実績を元に、申請者は同じ方式を踏襲しながら、より高出力で安定に駆動する Na 温度/風ライダーを北極圏 (ノルウェーのトロムソ ; 69° N) での観測のために開発に考案し開発に着手した。この高出力ライダーを用いれば、時間分解能が 1 時間から数分に飛躍的に短縮できる。そのためには、射出するパルスレーザーの周波数を絶対周波数で Na 散乱断面積内の 3 周波数で高速に切り替える観測手法が必要となる。この手法を確立することで、高出力パルスレーザーを高性能のライダー送信系として利用することができる。ライダーの波長制御をする部分をインジェクションシーダー系と呼び、この部分の手法の確立が本研究である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、レーザー周波数を制御するインジェクションシーダー系を組み、実験によりその性能評価を行い、観測によりその性能を実証することである。具体的な項目は、
 (1) パルスレーザーの周波数を決める種レーザー (1064 nm と 1319 nm 用) を用いて 589 nm 光を生成する。この光はパルスで生成する 589 nm と同じ周波数となる。
 (2) Na 蒸気セルを用いたドップラーフリー分光により 589 nm 光の絶対周波数モニター手法と周波数の制御を行う。
 (3) 1064 nm のインジェクションラインに高速周波数切り替えシステムを構築することで 589 nm 光の周波数を高速に切り替えるシステムを製作する。これらが実現することで、それらを統合してパルスレーザーへのインジェクションシーディング系が完成する。

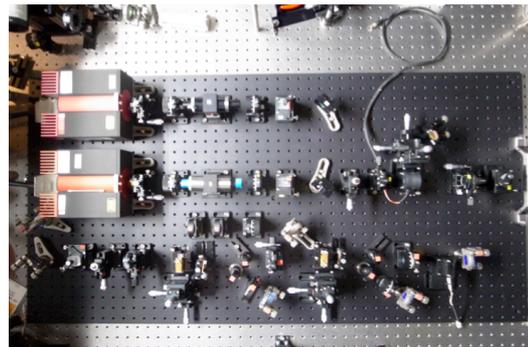
3. 研究の方法

(1) 1064/1319nm 用の種レーザー (シーダー) を周期反転分極結晶 (PPLN) に入れ、和周波である 589nm 光の生成を行う。2 種類のレーザーを結晶内で集光させるレンズ系と結晶の位置の微調整を行うマウントを製作し、589 nm 光を生成する。入力パワーに対して出力パワーの特性を計測する。(2) 生成した 589 nm 光を用いて Na 蒸気セル内を往復させ、飽和吸収分光計測を行う。光路と

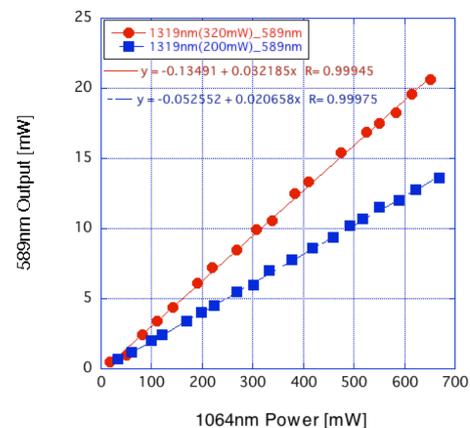
垂直方向から散乱光強度を計測し、スペクトルから絶対周波数モニターするシステムの構築を行う。光学系のみならず、レーザー周波数を計測された特定の周波数にロックし、安定化させるフィードバックコードの構築を行う。(3) 1064 nm のインジェクションラインの途中に、音響光学素子を用いたレーザー周波数の高速変換システムを構築する。周波数変換効率や、変換前後のレーザービーム射出方向の安定性確認実験などを行う。

4. 研究成果

構築したインジェクション系の写真を下記に示す。



(1) 種レーザーによる 589 nm の生成 : パルスレーザーに導入する狭帯域 1064/1319 nm 連続レーザーを周期分極反転結晶に入れ、和周波の 589 nm 光を生成した。その出力特性計測を行った。PPLN に入射するレーザーのパワーは 1064 nm が 665mW, 1319 nm が 320mW の時に最大出力 21mW を計測し、文献値を上回る結果を得た。下図は固定した 1319 nm レーザーパワーに対し 1064 nm レーザーパワーを減少させた時の 589 nm 光の出力を示す。周波数公正に用いる 589 nm 光の出力は 1mW 程度で良いため、十分な出力が得られていることがわかる。

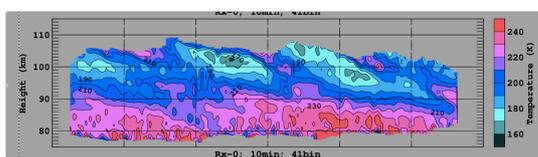


(2) ドップラーフリー飽和分光計測実験 : 生成した 589 nm 光を、加熱している Na 蒸気セルに通し、589nm のレーザー周波数を変え

ながら Na 蒸気セル内のナトリウム原子による共鳴散乱光をモニターし、絶対周波数の指標となる NaD2 線近傍の周波数スペクトルを計測した(下図)。また図の矢印の周波数に数 MHz の精度でレーザー周波数をロックする手法を考案しそれを実証した。



(3) 音響光学素子(AO)を用いたレーザー周波数の高速変換システムの構築: 589 nm 光の周波数変換に用いる 1064 nm 光路での周波数変換装置の製作を行った。変換装置からの 1064 nm 基準周波数のパワーは 80mW、+640MHz のシフトで 40mW、-640MHz のシフトで 30mW となり、インジェクションには十分な出力が得られた。また、高速な周波数変換が実現できた。(4) 以上のシステムを結合し、別途製作したパルスレーザーにインジェクションシーディングをおこない、レーザー周波数を切り替えながら Na 層の計測を行った。極めて質の高いデータが得られ、実際の観測でその有用性が確認できた(下図は温度の時系列データ)。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件 査読あり)

- (1) Tsuda, T, S. Nozawa, T. Kawahara, T. Kawabata, N. Saito, S. Wada, C. Hall, S. Oyama, S. Ogawa, Y. Suzuki, T. Ogawa, T. Takahashi, H. Fujiwara, R. Fujii, N. Matuura, A. Brekke. Fine structure of sporadic sodium layer observed with a sodium lidar at Tromsø, Norway. *Geophys. Res. Lett.*, vol 38, 2011, ISSN 0094-8276.s doi: 10.1029/2011GL048685.
- (2) Yue, J, She, C -Y, Williams, B P, Vance, J D, Acott, P E, Kawahara, T D: "Continuous-wave sodium D2 resonance radiation generated in single-pass sum-frequency generation

with periodically poled lithium niobate" *Optics Letters* 34. 1093-1095 (2009), 1

[学会発表] (計 35 件)

(1) 津田卓雄, 野澤悟徳, 川原琢也, 川端哲也, 斎藤徳人, 和田智之, 大山伸一郎, 高橋透, A. Brekke, C. M. Hall, 藤井良一: "ノルウェー・トロムソでのナトリウムライダー観測レポート" 理研シンポジウム「レーザーによる環境計測」. (20120224). 埼玉県和光市 (理化学研究所)

(2) 野澤悟徳, 川原琢也, 津田卓雄, 斎藤徳人, 和田智之, 川端哲也, 高橋透: "ナトリウムライダーを用いた北極域上層大気温度変動の解明" 理研シンポジウム「レーザーによる環境計測」. (20120224). 埼玉県和光市 (理化学研究所)

(3) 川原琢也 (他 5 名): "北極に設置したナトリウムライダーのインジェクションシーディング部分の現状" レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会. (20120131). 宮城県仙台市.

(4) S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. Tsuda, T. Kawabata, N. Saito, S. Wada, T. Takahashi, S. Oyama, H. Fujiwara, R. Fujii: "Study on variation of neutral temperature in the polar MLT region using a sodium LIDAR at Tromsø" 第 2 回極域科学シンポジウム/第 35 回極域宙空圏シンポジウム. (20111114). 東京都立川市 (国立極地研究所).

(5) 高橋透, 野澤悟徳, 堤雅基, 津田卓雄, 川原琢也, 斎藤徳人, 和田智之, 川端哲也, 大山伸一郎, 藤原均, 藤井良一: "ナトリウムライダーと流星レーザーを用いた極域 MLT 領域における大気重力波の研究" 第 2 回極域科学シンポジウム/第 35 回極域宙空圏シンポジウム. (20111114). 東京都立川市 (国立極地研究所)

(6) 川原琢也 (他 6 名): "Tromsø に設置したナトリウムライダーのインジェクションシーディング基本特性" 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 130 回総会・講演会. (20111104). 兵庫県神戸市 (神戸大学)

(7) 高橋透, 野澤悟徳, 堤雅基, 津田卓雄, 川原琢也, 斎藤徳人, 和田智之, 川端哲也, 大山伸一郎, 藤原均, 藤井良一: "ナトリウムライダーと流星レーザーを用いた大気重力

波フィルタリング効果の研究”地球電磁気・地球惑星圏学会 第 130 回総会・講演会.(20111104). 兵庫県神戸市(神戸大学)

(8) 高橋透, 野澤悟徳, 堤雅基, 津田卓雄, 川原琢也, 斎藤徳人, 和田智之, 川端哲也, 大山伸一郎, 藤原均, 藤井良一:”ナトリウムライダーと流星レーダーを用いた大気重力波の伝搬方向の同定” NICT/STEL 共催 2011 年度中間圏・熱圏・電離圏 (MTI) 研究会.(20110829) 福岡県福岡市(九州大学)

(9) S. Nozawa, T. T. Tsuda, S. Oyama, Y. Ogawa, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, C. M. Hall, A. Brekke, M. Kosch, H. Fujiwara, R. Fujii :”Response of the lower thermosphere to the solar wind energy input” AOGS 2011. (20110809). Taipei, Taiwan

(10) T. T. Tsuda, S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. Kawabata, N. Saito, S. Wada, S. Oyama, H. Fujiwara, Y. Ogawa, S. Suzuki, R. Fujii, T. Ogawa, N. Matuura:”Sporadic sodium layer observed at Tromsø, Norway (69.6N, 19.2E)” IUGG 2011. (20110706). Melbourne, Australia

(11) 川原琢也(他 6 名): 津田卓雄, 野澤悟徳, 斎藤徳人, 和田智之, 川端哲也, 藤井良一”Na ライダーのレーザー波長制御技術: Injection Seeding の評価” 日本地球惑星科学連合 2011 年大会. (20110527).幕張メッセ国際会議場

(12) 野澤悟徳, 川原琢也, 津田卓雄, 川端哲也, 斎藤徳人, 和田智之, 高橋透, 大山伸一郎, 藤原均, 藤井良一:”トロムソナトリウムライダーの 2010 年度観測概要” 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, (20110527).幕張メッセ国際会議場

(13) 津田卓雄, 野澤悟徳, 川原琢也, 川端哲也, 斎藤徳人, 和田智之, 大山伸一郎, 藤原均, 小川泰信, 鈴木臣, 藤井良一, 小川忠彦, 松浦延夫:”トロムソナトリウムライダーで観測されたスボラディックナトリウム層” 日本地球惑星科学連合 2011 年大会. (20110527).幕張メッセ国際会議場

(14) 高橋透, 野澤悟徳, 津田卓雄, 大山伸一郎, 川端哲也, 川原琢也, 斎藤徳人, 和田智之, 藤原均, 藤井良一:”トロムソナトリウムライダーによって観測された数時間周期の中性大気温度変動” 日本地球惑星科学連合 2011 年大会. (20110527).幕張メッセ国際会議場

(15) 川原琢也(他 6 名):”Tromso に設置した Na lidar の波長制御系”第 16 回大気ライダー研究会.(20110308).秋葉原(首都大学サテライトキャンパス)

(16) 野澤悟徳, 川原琢也, 津田卓雄, 斎藤徳人, 和田智之, 川端哲也, 高橋透:”トロムソナトリウムライダーを用いた北極域上層大気温度変動” 第 16 回大気ライダー研究会.(20110308). 秋葉原(首都大学東京サテライトキャンパス)

(17) 津田卓雄, 野澤悟徳, 川原琢也, 川端哲也, 斎藤徳人, 和田智之, 高橋透, 大山伸一郎, 藤原均, 藤井良一:”北欧トロムソにおけるナトリウムライダー観測” 第 15 回大気ライダー観測研究会講演集, 45-46, (20110308). 秋葉原(首都大学東京サテライトキャンパス)

(18) S. Nozawa, T. Tsuda, T. D. Kawahara, N. Saito, S. Wada, S. Oyama, Y. Ogawa, C. Hall, A. Brekke, R. Fujii :”High-latitude lower thermospheric wind dynamics using EISCAT and MF radars and a new sodium lidar, The 4th IAGA/ICMA/CAWSES-II TG4 Workshop on Vertical Coupling in the Atmosphere-Ionosphere System” (20110205). Prague, Czech Republic

(19) T. T. Tsuda, S. Nozawa, T. D. Kawahara, N. Saito, T. Kawabata, S. Wada, S. Oyama, R. Fujii, Y. Ogawa, A. Brekke, C. M. Hall :”Neutral temperature variations observed with a new sodium lidar at Tromsø, Norway, The 4th IAGA/ICMA/CAWSES-II TG4 Workshop on Vertical Coupling in the Atmosphere-Ionosphere System”. (20110205). Prague, Czech Republic

(20) 川原琢也, 斎藤徳人, 和田智之, 野澤悟徳, 川端哲也, 津田卓雄, 藤井良一:”Na ライダー観測のための音響光学素子を用いた高速周波数シフターの開発” レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会.(20110109). 東京都調布市(電気通信大学)

(21) 斎藤徳人, 月花智博, 川原琢也, 野澤悟徳, 川端哲也, 津田卓雄, 小泉俊郎, 和田智之:”ナトリウムライダーのための全固体ナトリウム D2 線共鳴コヒーレント光源” レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会.(20110109). 東京都調布市(電気通信大学)

(22) 川原琢也, 野澤悟徳, 津田卓雄, 川端哲也, 藤井良一, 斎藤徳人, 和田智之: "北極域観測用新型ナトリウムライダーの現状" 第33回極域宙空圏シンポジウム. (20101202). 東京都立川市(国立極地研究所)

(23) 川原琢也, 斎藤徳人, 野澤悟徳, 和田智之, 川端哲也, 津田卓雄, 藤井良一: "Tromso に設置した新型ナトリウムライダーのための新型周波数シフターの実験" 第128回SGEPSS総会および講演会. (20101102). 沖縄県那覇市

(24) 高橋透, 野澤悟徳, 川原琢也, 津田卓雄, 川端哲也, 大山伸一郎, 藤井良一, 斎藤徳人, 和田智之, Asgeir Brekke, Chris Hall: "新トロムソナトリウムライダーの初期観測結果" 第128回SGEPSS総会および講演会. (20101102). 沖縄県那覇市

(25) 田中健一, 川原琢也: "音響光学素子を用いた周波数切り替え装置の光学実験" 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2010. (20101029). 長野県上田市(信州大学繊維学部)

(26) 川原琢也, 斎藤徳人, 野澤悟徳, 和田智之, 川端哲也, 津田卓雄, 藤井良一: "音響光学素子を用いた新型周波数シフターの提案" 第28回レーザーセンシングシンポジウム. (20100909). 滋賀県大津市

(27) Tsuda, T. T., S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. Kawabata, S. Oyama, R. Fujii, Y. Ogawa, N. Saito, S. Wada, A. Brekke, C. M. Hall: "A sodium lidar project at Tromsø, Norway: First report on test observations at Wako, Japan" CAWSES-II Kick-Off Symposium. (20100616). 京都府宇治市(京都大学)

(28) Nozawa, S., Y. Ogawa, S. Oyama, H. Miyaoka, T. D. Kawahara, T. T. Tsuda: "Research on the lower thermosphere and mesosphere using EISCAT radars, and other instruments" CAWSES-II Kick-Off Symposium. (20100616). 京都府宇治市(京都大学)

(29) 川原琢也, 野澤悟徳, 川端哲也, 津田卓雄, 藤井良一: "Na ライダーに応用する音響光学素子高速周波数シフター" 日本地球惑星科学連合2010年大会. (20100527). 幕張メッセ国際会議場

(30) 野澤悟徳, 川原琢也, 津田卓雄, 川端哲也, 大山伸一郎, 藤井良一, 塩川和夫, 小

川泰信, 斎藤徳人, 和田智之, Brekke Asgeir, Hall Cluis M.: "トロムソ拠点観測「ナトリウムライダー」の初期結果" 日本地球惑星科学連合2010年大会. (20100527). 幕張メッセ国際会議場

(31) 津田卓雄, 野澤吾徳, 川原琢也, 川端哲也, 大山伸一郎, 藤井良一, 小川泰信, 斎藤徳人, 和田智之, Brekke Asgeir, Hall Chris M.: "ノルウェー, トロムソにおけるナトリウムライダー観測" 日本地球惑星科学連合2010年大会. (20100527). 幕張メッセ国際会議場

(32) Kawahara, T. D., 他 5 名: "Development of the new sodium LIDAR to be installed at Tromsø : part 2 ~Newly developed all solid state sodium lidar system~" 極域宙空圏シンポジウム. (20091112). 東京都立川市

(33) 川原琢也, 他 5 名: "周期反転分極結晶を用いた和周波による cw 589nm レーザの生成" 応用物理学会秋学会. (20090910). 富山市

(34) 川原琢也, 他 6 名: "LD 励起 Nd : YAG 和周波型 589nm レーザのための周波数制御実験" 第27回レーザーセンシングシンポジウム. (20090904). 那須

(35) 月花智博, 川原琢也, 他 5 名: "LD 励起 Nd : YAG 和周波による 589nm パルスレーザーの製作" 第27回レーザーセンシングシンポジウム. (20090904). 那須

[その他]
ホームページ等

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/~eisca/t/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川原 琢也 (KAWAHARA TAKUYA)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号: 40273073