

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24310010

研究課題名(和文) ナトリウムライダーの新規観測モード：3次元観測への拡張

研究課題名(英文) New observation of the sodium lidar: upgrading to a three dimensional observation mode

研究代表者

川原 琢也 (KAWAHARA, Takuya)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：40273073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,400,000円

研究成果の概要(和文)：現在ノルウェーで運用中の全個体素子高出力高安定ナトリウムライダーのシステムを拡張し、世界初の全空間観測が実現できる送受信系を開発する。

送信系には、2つの高精度回転ステージにミラーを取り付け全方向射出可能な送信系を製作した。受信系は追尾型天体望遠鏡を採用した。望遠鏡のファインダーにとりつけたCCDカメラでとらえたレーザー画像で、画像内のレーザー先端位置を検出するアルゴリズムを開発した。この情報を元に回転ステージの操作にフィードバックをかけ、先端を画像中心の主望遠鏡の視野に入れるアルゴリズムを開発した。これらの動作を実験により実証した。今後は現地での実証試験を行っていく。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to upgrade the sodium lidar deployed in Tromsø, Norway, which we developed as an extremely stable and high power laser system.

New laser transmitter consists of two mirrors equipped on the electrically controlled two rotary stages which enable us multi-direction transmission. A 35cm-diameter tracking telescope is employed for the receiver with two CCD cameras on the finder and the main telescope. The key issue of this research is that both the laser direction and the line of sight of the telescope should match within the angle of 1mrad (0.056 degree). In the developed system, the finder with a CCD camera on the main telescope monitors wide view (50 mrad) area to capture the laser line, and we find out the top edge coordinate of the laser line. From the coordinate data, the rotary stages are controlled to adjust the laser top edge to the center of the viewing area of the narrower main telescope area (1 mrad sq.).

研究分野：大気リモートセンシング

キーワード：ナトリウムライダー 全天観測 レーザー 北極 ノルウェー

1. 研究開始当初の背景

ナトリウムライダーは、1970年代から用いられてきた中間圏界面(80-110km 高度)を観測する観測器である。鉛直方向1次元の観測ながら、レーザの進化と観測技術の発展によりナトリウム密度のみならず背景の大気温度や風速の高度分布が高空間分解能で計測できる装置として発展をしてきた。特に大気の絶対温度の計測は大気の詳細な物理を議論する際に不可欠かつ電波計測では得られないため、レーダーでの風系観測とともにライダーの温度・風観測は不可欠となっている。一方で、時間分解能はレーザの出力や望遠鏡の口径に依存する受信光強度に依存しており、従来の観測では十分な積算時間を確保するために観測方向が鉛直方向のみに限られていた。

近年、信州大学と名古屋大学、理化学研究所が共同で全個体素子の高出力高安定なナトリウムライダーを開発し北極圏のノルウェーのトロムソにある EISCAT レーダー観測所で観測を行っている。レーザ出力が 4W と従来のレーザと比較して格段に大きいため、観測方向を変えながら観測しても1方向の時間分解能は従来のままで空間をスキャン観測が可能である。

そこで、この高性能ライダーをさらに拡張すべく、従来の中間圏界面を観測するライダーでは行われてこなかった全天の任意方向の観測が可能となるライダー送受信系の開発を行う。これによりオーロラの出現方向に応じて観測方向を変えていたレーダー観測と同じ方向での観測が可能となり、同一場所での計測値を付き合わせることで、より詳細な議論が可能となる(図1)。

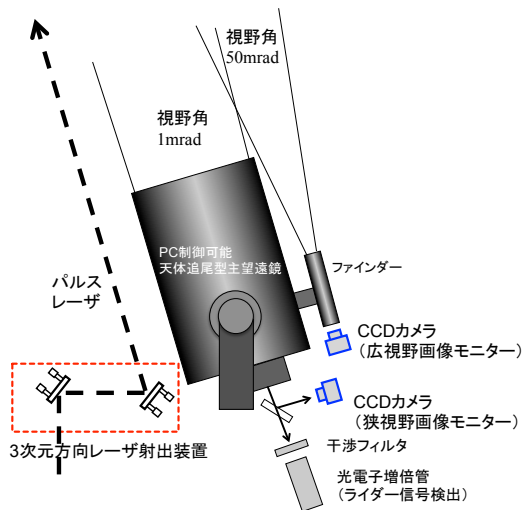


図1 全空間方向観測用の送受信系イメージ図

2. 研究の目的

本研究は、ノルウェーのトロムソにある EISCAT レーダー観測所に設置した高性能

ナトリウムライダーを天頂方向の1次元観測から任意の方向観測が可能となる全天(3次元方向)観測システムに拡張するために、送受信系のハードウェアとソフトウェアを開発することを目的とする。レーザ射出系は回転ステージを用いて全天方向に射出可能であることがわかっている。望遠鏡は、PC駆動可能な天体追尾型望遠鏡を使用する。さらに、送受信系独立制御で同一方向を観測するための、画像処理を用いたレーザ方向モニターと方向制御のシステムを開発する。これらにより素早く任意の方向に対して観測態勢を整えるシステム開発を目的とする。

3. 研究の方法

観測目的を元に開発項目を以下のように区分する。

- ① 送信系: 2つの回転ステージを組み合わせ、それぞれ鉛直と45°の面となるように2枚のミラーを取り付けた送信系の製作とポインティング方向の実証試験
- ② 受信系: 天体追尾型望遠鏡をPC制御し、天空の絶対方向に対しポインティングできる技術精度の検証
- ③ ソフトウェア: 望遠鏡に取り付けてあるファインダーで広視野(視野角50mrad)の画像をCCDでモニターし、その画像中のレーザビームの先端を検出する画像解析アルゴリズムの開発
- ④ ソフトウェア: 検出したレーザ先端を画像中心(主望遠鏡の視野内)方向に移動させる回転ステージへのフィードバック制御手法の開発

4. 研究成果

送信系のハードウェア開発は、レーザを射出する部分に2つの回転ステージ(Aerotech, ALAR-100-LPとADRS-100)を用い、ミラーを取り付けることで3次元方向にレーザ射出が可能となった。鉛直下方から1枚目の45°ミラー(鉛直軸回転ステージに取り付けてある)にあたるレーザは水平方向に向かい、もう1枚の45°ミラー(鉛直軸回転ステージ上に設置してある水平軸回転ステージにとり付けてある)で鉛直方向を含む平面内に射出される(図2)。水平軸回転ステージを回転させることで鉛直方向を含む平面内での観測が可能で、鉛直軸回転ステージを回転させることでその面を回転させて全天方向にレーザを射出することができる。このシステムを用いて射出方向の方向決定精度の検証を行った。レーザを主望遠鏡視野内(1mrad)から外して再度同じ場所をポイントさせた時の空間的なズレをCCDカメラを用いて画像取得し検証した(図3)。この結果、ポインティング精度のばらつきは0.03mrad程度で、望遠鏡視野中心付近に収まることが確認できた。これは、ナトリウム層100km高度に

て、100m の望遠鏡視野内で 3m 程度のばらつきに相当し、ポインティング精度は極めて高いことが確認できた。



図 2 回転ステージ上のミラー。図の左が水平軸回転ステージに取り付けられたミラー、右が鉛直軸回転ステージに取り付けられたミラー。

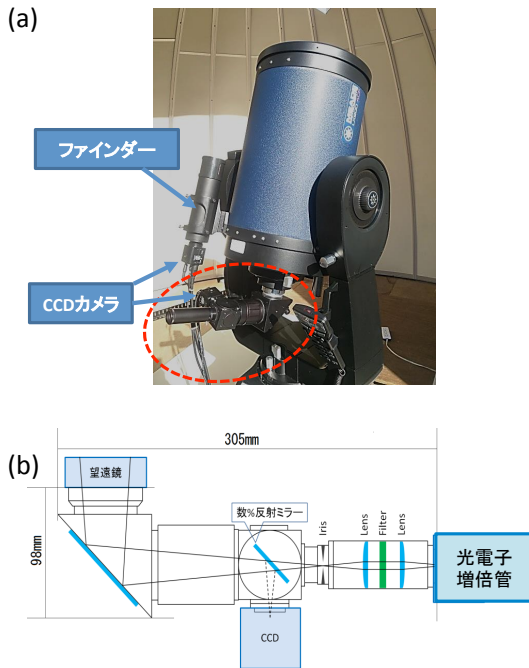


図 3 (a) 受信望遠鏡 (b) 受信系の設計図

受信系のハードウェアは、天体追尾型の望遠鏡(Meade LX200、口径 35cm)を導入した。(図 3a) この望遠鏡は GPS により観測位置と東西南北の方向の自動認識を行う機能を持つ。PC による方向制御で任意の方向にポインティングできる。主望遠鏡と主望遠鏡の上に同視線軸で取り付けられる口径 5cm のファインダーには、視線方向確認のため、視線方向画像取得のための CCD 素子を取り付けた。主望遠鏡の受信系は、ライダーデータ取得のための光電子増倍管の光路に光の分岐ミラーを取り付け、視野中のレーザーの位置を確認しながらライダーデータを取得する構造となっている(図 3b)。これらを用いて受信望遠鏡の観測方向再現精度実験を行った(図 4)。方向を固定したレーザーを上空に射出し、望遠鏡で別方向を見た後再度レーザーと

同じ方向を向くように制御し、位置のズレを計測した。その結果、0.04mrad 程度のばらつきで同一方向を見ることが分かった。以上の結果により、あらかじめ観測する方向を複数決めて繰り返し観測する場合には独立制御でも主望遠鏡視野内にレーザーを捉えることが可能であることが分かった。

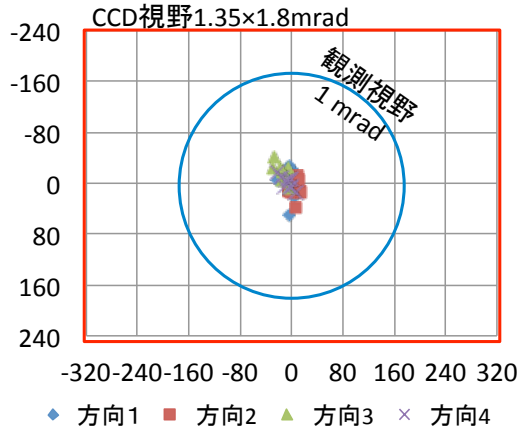


図 4 レーザ先端座標のばらつきと主望遠鏡での観測視野

次に天空の任意の場所を観測しようとした場合、望遠鏡が見る絶対方向に対しレーザー方向がずれた場合の補正に関する手法の検証を行った。我々のシステムでは送受信系の姿勢を調整することによりファインダーの視野範囲である 50mrad 以内の範囲にレーザーが収まることを前提に進めた。この前提のもと、ファインダーの視野にレーザーを捉えたのちの処理として、CCD 画像上でレーザーを認識、先端を検出し、それを画像中心(主望遠鏡の 1mrad の視野)に移動させるよう回転ステージ制御にフィードバックをかけるアルゴリズムを開発する。

(a) レーザ先端座標の自動算出方法

ファインダーの 256 階調のグレー画像において、各画素の明るさからヒストグラムを作り、閾値を決めて画像を二値化し、明るいレーザーや星と背景とを分離する。明るい画素周辺の明るい画素を集団と捉えて画像上でグループ分けを行い、星やレーザーの領域を検出する。レーザーは明るい面積が星よりも大きいと考えられるため、最大の面積を持つ領域をレーザーと捉える。256 階調のグレー画像を用い、判別したレーザー画素の位置を座標と捉えて最小二乗法により中心線を求め(図 5a)、その線上の画素の階調をグラフ化すると、背景に落ち込むところがレーザー先端座標として求められる(図 5b)。

(b) レーザ先端を画像中心まで移動する手法

レーザー先端座標を特定後、2 つの回転ステージを順次一定角度だけ回転させ、先端座標が移動する方向のベクトルを求める。これらのベクトルは直交していると仮定し画像中

心までのベクトル量でどれだけなのかを算出し、それを元に回転ステージの回転角度を求め画像中心まで先端座標を移動させる。

以上の実験により、レーザ先端は画像中心から平均で縦横方向に 0.01mrad のずれがあり 0.08mrad のばらつきを持つ結果となった。いずれも主望遠鏡の視野角 1mrad と比較して小さな値で、この手法によりレーザを主望遠鏡視野に入れることが可能と判断した。

以上は全て信州大学での実験結果となる。これを観測地であるノルウェーのトロムソでの高出力 589nm レーザを用いて実証し、テスト観測から本観測へと拡張していく。

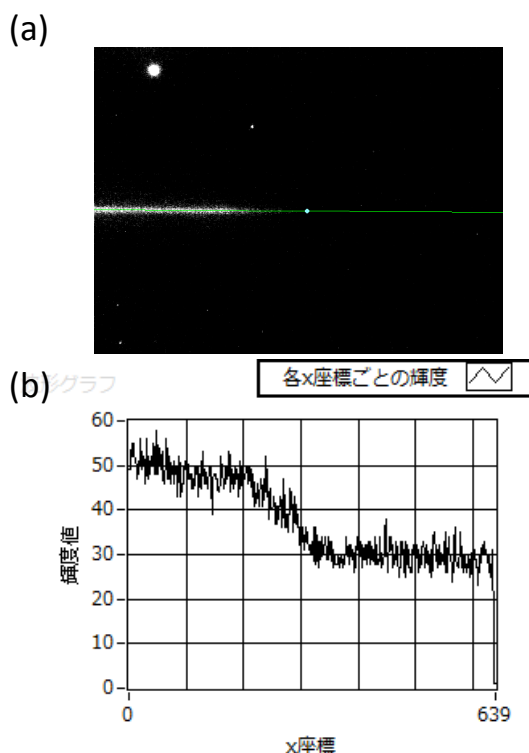


図 5 (a)レーザ元画像と中心線。中央の点は求めたレーザ先端。(b)中心線上の輝度。輝度値 30 が背景光強度。

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)

[学会発表] (計 8 件)

① Muranaka, W., T. Kawahara, S. Nozawa, (Results and outline of multi-direction lidar system experiments, American Geophysical Union Fall Meeting 2014, 2014.12.16, San Francisco)

② 村仲 渉, 川原琢也, 野澤悟徳, (トロムソナトリウムライダーの 3 次元観測化: 観測想定実験と検証), 第 136

回地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会, 2014.11.2, KISSEI 文化ホール (松本市)

③ 村仲 渉, 川原琢也, 野澤悟徳, (トロムソナトリウムライダーの 3 次元観測化: 同期実験と検証), 日本地球惑星科学連合 連合大会 2014, 2014.5.30, 幕張メッセ

④ Kawahara, T., S. Nozawa, N. Saito, T. Tsuda, S. Wada, T. Kawabata, (All solid state, high power (4 W) sodium temperature/wind lidar deployed at EISCAT radar site, Norway (69.6°N, 19.2°E)), International CAUSES-II Symposium, 2013.11.20, Nagoya University

⑤ 村仲 渉, 川原琢也, 野澤悟徳, (トロムソナトリウムライダーの 3 次元観測化: システムと検証実験), 第 134 回 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013.11.4, 高知大学

⑥ 村仲 渉, 川原琢也, 野澤悟徳, (3 次元ナトリウムライダー送受信系の実験初期結果), 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013.5.21, パシフィコ横浜

⑦ Kawahara, T., (Features of the laser system of the Sodium LIDAR at Tromsø), Japan-Norway Symposium on Space Sciences in Polar Region, 2012.6.4, Oslo

⑧ 川原琢也, 野澤悟徳, 津田卓雄, (トロムソナトリウムライダーを用いた 3 次元観測システム(1)概要), 日本地球惑星科学連合 2012 年度連合大会, 2012.5.23, 幕張メッセ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川原 琢也 (KAWAHARA, Takuya)
信州大学・学術研究院工学系・准教授
研究者番号: 40273073

(2)研究分担者

野澤 悟徳 (NOZAWA, Satonori)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授
研究者番号：60212130

(3)連携研究者

津田 卓雄 (TSUDA, Takuo)
電気通信大学・情報理工学研究科・助教
研究者番号：9044421