

令和元年6月11日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03129

研究課題名(和文) LEDライダーによる実環境を対象とした局所大気・ガスの可視化

研究課題名(英文) Local Atmosphere and Gas on-site Visualization by LED lidar

研究代表者

椎名 達雄 (Shiina, Tatsuo)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80304187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では実環境を対象とした局所大気の可視化を目的としている。ビル風や工事現場でのガス流出、工場から巻き上がるダスト監視等、現技術では可視化を為し得ていない局所大気の可視化を行う。本研究ではこれまで開発してきたパルス化したLED光を光源としたミニライダーを擬似ランダム変調によって昼間計測へ対応させ、リアルタイムでの画像化によってこの課題に挑んだ。局所で使うために瞳への安全性と低消費電力、ならびにバッテリー駆動を可能とする携帯性を合わせることで、実環境(現場使用)を前提とした遠隔計測での局所大気の可視化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

局所大気は住環境において直接生活に影響する関心の高いものである。特に都市部においてダストや危険ガスの影響は無視できない。本研究の成果は大気をめぐる生活環境の客観的評価を与え、安全安心を供するものである。一方の工場や道路環境を管理する側への安全基準の指針として計測・評価結果を利用することが可能である。これまでは時間平均をとった代表値であった指標が、時間変化を伴うものとして、また具体的な影響のエリア分布を把握して可視化することで、現実に即した評価が可能である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focused on the local atmosphere on-site visualization. Winds blowing through buildings, gas and dust flows on a contraction site and a factory are our target for visualization. LED pulsed beam was modulated as quasi random code for daytime measurement. We tried to visualize the monitoring results in real time. The LED lidar was arranged as a viewpoint of safety, low power consumption, and battery operation. We developed the visualization system based on remote measurement of the local atmosphere by this LED lidar.

研究分野：光電計測

キーワード：ライダー LED 局所 大気 ガス ラマン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

工場内外で発生したガスが原因となる事故や災害が後を絶たない。東日本大震災によって生じた福島第一原子力発電所での水素爆発もさることながら、山口県岩国市における化学工場爆発、新潟県南魚沼市におけるトンネル内ガス爆発事故が発生し、その他にもガスボンベの爆発による死亡者が出る等の事故が続いている。それぞれの作業環境下で各種センサーが付いていた、もしくは安全対策が取られていたにもかかわらず、事故を防げずにいる。国内では毎週のようにガス爆発や火災のニュースが流れている。工場内/外大気（粉塵、異臭、危険ガス漏洩）の正常化、イベントホールや駅といった閉空間/局所的空間における大気の検査や、環境/健康サイドからのモニタリングに対する需要は年々高まりを見せている。

現在発生しているガス爆発関連の事故を未然に防ぐ上で、既存の計測技術が未熟であることは否めない。接触式のガスセンサは感度が高いものの、浮遊するガス、もしくは位置が予測できない箇所が発生したものを検知することは難しい。遠隔のガス計測法として、透過率計方式のセンサがあるが、実質的には先の接触式のセンサと同じ欠点を持ち、空間全体を対象とはできない。

ライダー（レーザーダ）は大気やガスを遠隔で計測する技術としては好ましいものの、距離分解能が足りない、機器が大きい、レーザー使用時の安全性を確保できない、電源の安定性依存や機器の脆弱性故に、上記のような実環境、特に局所大気の現場に投入できない現状がある。加えて、近距離大気や流出ガスは動きが速い。また、近距離大気の挙動（流動や対流、停滞等）は大気やガスに依存するだけでなく、閉所の構造や壁面の材質、熱源/水源といった付加的な環境に大きく依存する。それ故、局所的大気/ガスの分布や挙動の把握が難しいものとなっている。

本研究では LED 光をパルス化したミニライダーを開発してきた。レーザーの脆弱性（電源の安定性依存や静電気への対処等）を克服し、バッテリー駆動が可能な携帯型のミニライダーの実現を図ってきた。

2. 研究の目的

本研究では実環境を対象とした局所大気の可視化を目的としている。ビル風や工事現場でのガス流出、工場から巻き上がるダスト監視等、現技術では可視化を為し得ていない局所大気の可視化を行う。本研究ではこれまで開発してきたパルス化した LED 光を光源としたミニライダーを擬似ランダム変調によって昼間計測へ対応させ、リアルタイムでの画像化によってこの課題に挑む。局所で使うために瞳への安全性と低消費電力、ならびにバッテリー駆動を可能とする携帯性を合わせることで、実環境（現場使用）を前提とした遠隔計測での局所大気の可視化を実現する。研究成果の応用として、特定ガス（メタンガス）の実時間モニタリングによる可視化を行う。

3. 研究の方法

(1) LED ミニライダーへの擬似ランダム変調の搭載

現行の LED パルス光の発光は一定の高速周期(500kHz)で行っているが、擬似ランダム変調させることで、背景光が多い昼間の観測で、エコー期待値を最大化させた受光を可能とする。そのために、擬似ランダム変調を搭載した LED パルス駆動回路を開発する。ホトンカウンタとの同期が不可欠であるため、高速ホトンカウンタからのクロック信号に同期した擬似ランダムコードの生成を行い、それを LED 駆動回路へと引込む。コードの復調はホトンカウンタ内の FPGA で高速処理を行うことで、現行の 500kHz のパルス高繰り返しな積算による S/N 比と空間分解能 ($1\text{ns}=0.15\text{m}$) を維持しながら、昼間計測を実現する。

(2) 高速スキャニングによるリアルタイムでの局所大気の可視化

携帯性の高い LED ミニライダーは送受信を一体として、天体観測用トラッカー（自動追尾装置）に搭載が可能である。LED パルス光が $>500\text{kHz}$ と高繰り返しであるため、高速でのスキャニングが実現できる。一方で、対象大気/ガスの信号対雑音比を十分高めるためには積算時間を必要とする。先の擬似ランダムコードによる発光の場合にはさらに符丁コードによる復調が合わさるため、スキャニング速度と分解能はこれらの最適値を要求する。本研究ではそれらを現場に必要な分解能、計測対象の分布や濃度をパラメータとして視覚化を図る。

(3) 具体的応用としての特定ガス実時間モニタリングによる可視化

トレースガスとして、メタンガスを使った、実時間モニタリングを行い、高速スキャニングによる可視化を行う。LED 光はスペクトル幅が広い分、ガスによる吸収量が LD の単線による場合と比べて、大きく、定量評価が有利となる。IR-LED (3-7 μm) の LED 光による測定を行う。

研究では測定分解能、分布状況の可視化を図る際、機器によって決まる物理的精度から理論的な測定精度を算定し、測定結果の可視化に合わせて表示し、その違いを測定誤差と対象の変動の観点から考察する。対象をガスの可視化の場合、aerosol (風) の可視化とする場合とで分けて考察し、現場毎に最適化させるためのノウハウを蓄積する。

4. 研究成果

(1)平成 28 年度

これまで LED ライダーでは LED パルス光の発光は一定の高速周期(500kHz)で行っている。LED パルス発光をトリガとしてホトンカウンタと同期している。この LED パルス発光を擬似ランダム変調させ、信号対雑音比の向上を図る。擬似ランダム変調は光通信の復調に利用される技術であり、ライダーにおいても 1980 年代に低出力 LD 光を利用する目的で導入されている。特に背景光が多い昼間の観測で、微弱なエコー受光の期待値を最大化させた受光を可能とする特徴がある。本研究では、擬似ランダム変調を行った際の変調コード長に依存した空間分解能の劣化をパルス積算過程の中で補い、ホトンカウンタが持つ高分解 (1ns) を得ることを目的とした。そのための数値解析を先行させ、パルス幅(>10ns)と繰り返し周波数 (>1MHz)、ホトンカウンタ分解能 (1ns)、擬似ランダム変調符丁コード長との間の最適値を得る。

具体的な開発事項として、擬似ランダム変調の信号対雑音比 (SN 比) 改善の効果を数値解析シミュレーションによって評価した。LED ライダーの計算条件を Table 1、またその結果を Fig.1 に示す。LED パルスライダー-SN 比を改善することもさることながら、近距離では LD パルスライダーよりも高い SN 比を持つことが見て取れる。擬似ランダム変調は昼夜問わず高い SN 比を持つことも特徴であり、現在 LED パルスライダーでは成し得ていない昼間の観測で、その効果を期待できる。

シミュレーション結果を踏まえて、擬似ランダム変調を搭載した LED パルス駆動回路を開発した。ホトンカウンタとの同期が不可欠であるため、高速ホトンカウンタからのクロック信号に同期した擬似ランダムコードの生成を行い、それを LED 駆動回路へと引込む構成とした。発振回路と LED パルス発光回路を分離し、入力した外部トリガ信号で発光できるよう構成を新しくした。これによって、ホトンカウンタの高速クロックによって変調コードのシフトが可能となった。コードの復調は同じホトンカウンタ内の FPGA(Spartan6)で高速処理を行うことで、現行の 500kHz のパルス光繰り返しの積算による S/N 比と空間分解能 (1ns=0.15m) を維持しながら、昼間計測を実現する。

擬似ランダムコードの生成はホトンカウンタを構成する FPGA に組み込んだ。コード長やクロック数を制御できるようにし、ライダーの計測距離と分解能、積算数との関連で最適化を図る。次年度からライダー構成での実応用を図る。

当初計画した LED ライダーの構築と擬似ランダムコードの生成を含むホトンカウンタの製作を終えた。開発した LED ライダーを Fig.2 にまとめる。パルス駆動回路をこれまでの一定周期のものから、ホトンカウンタで生成した変調コードによる擬似ランダムなパルス列の発光を実現した。ライダーの構成での基本送受信特性も確認しており、ライダーの計測距離と分解能、積算数との関連で最適化を図る。

本手法は積算回数が信号対雑音比を決めるだけでなく、復調時の符丁コード長に依存した分解能を決めることにもなる。従って、計測対象大気・ガスの濃度や分布によっても可視化の状況が変化することが想定される。あらかじめ、数値解析による条件を選定し、実際に搭載するランダム変調の符丁コード長を決めるようにする。そのため、これまでに報告されてきた擬似ランダム変調ライダーに関する文献を調査し、本 LED ライダーに応用しやすい変調コード、及びその長さに関する検討を行った。LED ライダーに擬似ランダム変調を搭載した際の高分解データ処理アルゴリズムを検討している。信号対雑音比と高い空間分解能を維持しながら、昼間計測を実現することを目指す。

Table 1. LED Lidar specifications compared with pulse modulation and RM-CW modulation.

Transmitter		Receiver	
Light Source	NUV-LED NCSU034B (Nichia Corp.)	Cassegrain	
Wavelength	$\lambda = 385 \text{ nm}$	Primary Mirror Aperture	10 cm ϕ
Beam Divergence	70 mrad	Primary Mirror Focal Length	72.25 mm
Beam Size	3 cm ϕ	Secondary Mirror Diameter	2.5 cm ϕ
Pulse		Secondary Mirror Focal Length	-25 mm
Pulse Width	10 ns	F.O.V.	3 mrad
Peak Power	$P_p = 0.75 \text{ W}$	Aperture	1 mm
Pulse-Repetition Frequency	500 kHz	Sensor	PMT Hamamatsu R6350
Modulation			
Ave Power	$P_o = 37 \text{ mW}$ (PRBS-8) $P_o = 21 \text{ mW}$ (PRBS-12)	Number of elements	$N = 255 (2^8 - 1)$ $N = 4095 (2^{12} - 1)$
clock time	$dt = 8 \text{ ns}$ (PRBS-8) $dt = 12 \text{ ns}$ (PRBS-12)	Period	$T = 2 \mu\text{s}$ (PRBS-8) $T = 49 \mu\text{s}$ (PRBS-12)

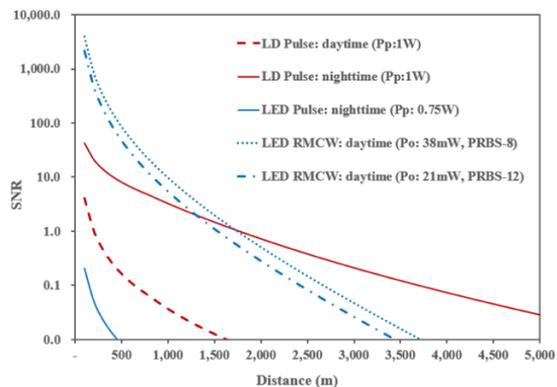


Fig.1 Simulated SNR of a pulse modulated LED mini lidar and an LD lidar, and RM-CW LED mini lidar with respect to 1 second integration time.

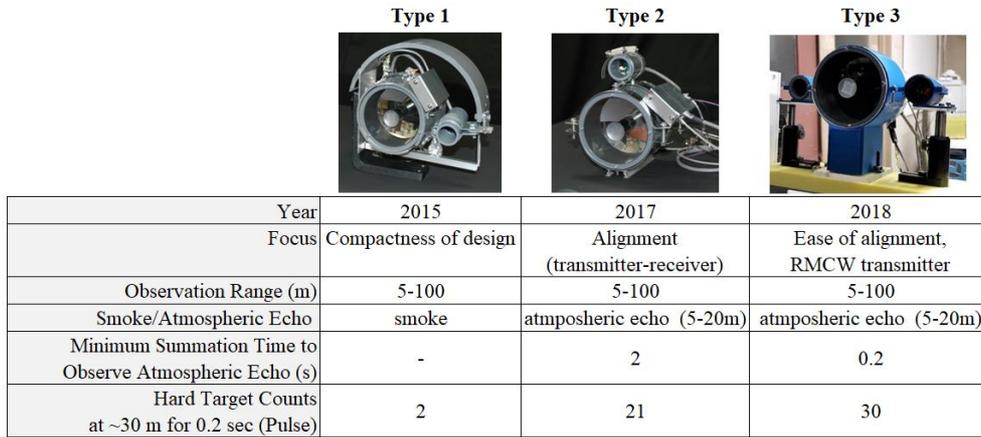


Fig.2 LED lidar development.

(2)平成 29 年度

本研究では LED パルス発光を擬似ランダム変調させ、微弱な LED ライダーにおける信号対雑音比の向上を図る。特に背景光が多い昼間の観測で、微弱なエコー受光の期待値を最大化させた受光を可能とすることで、局所大気・ガスの可視化を目指している。

擬似ランダム変調を搭載した LED ライダーは送信光強度の最適化を図り、その具体的なパルス出力をもとに、擬似ランダム変調のコード長、変調周波数、ならびに実質的な分解能、積算数の設計、検討を行った。数値解析によるシミュレーションによって、装置パラメータを設定し、標準大気ならびに特定ガス（ラマン散乱を想定）による解析を進めている。現在使用しているデバイスの仕様をパラメータとして、擬似ランダム変調導入による信号対雑音比の改善を数値解析として検討している。その最適化を実装置の変調コードの仕様としてフィードバックする。

一方で、LED ライダーによって局所大気・ガスの可視化を行う手立てとして、送信光波長と同じ波長で計測するミーライダーと、特定ガスを対象としたラマンライダーを製作した。この2台の LED ライダーを同期して計測を行った。大気計測では、ミーライダーでエアロゾル、ラマンライダーでは大気窒素、ならびに水蒸気を計測した (Fig.3 参照)。いずれも現状は一定周期のパルス光計測ため、昼間の計測はできず、夜ならびに室内での測定結果となった。波浪の動的な観測や、人口竜巻の定点観測ならびに観測方向をスキャンした局所大気・ガスの可視化を試みた (Fig.4, 5 参照)。これらの測定結果を現状の信号対雑音比とみなし、この結果をもとに、擬似ランダム変調を搭載した LED ライダーの信号対雑音比の改善を評価する。

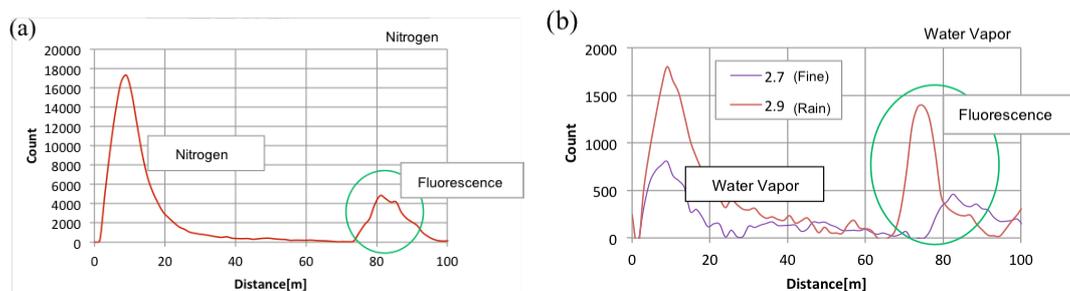


Fig.3 Atmospheric measurement by LED mini-Raman lidar. (a) Nitrogen Raman echo (b) Water Vapor echo.

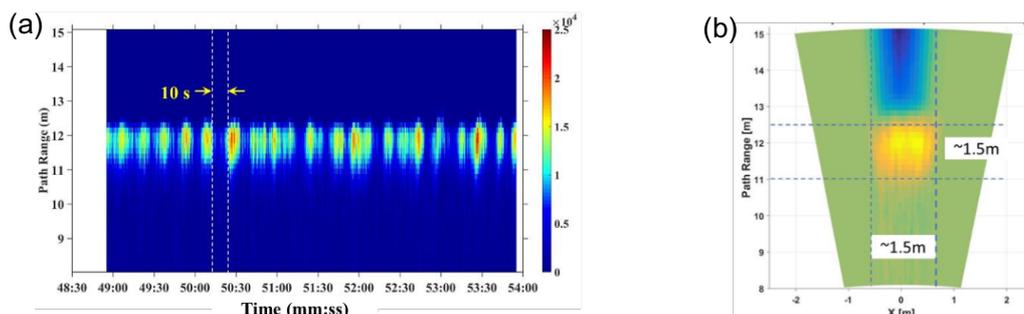


Fig. 4 Artificial twister observation experiment. (a) Time-distance profile of the measured twister for a 5-minute data acquisition time. (b) Horizontal distance-to-lidar path range plot of the twister given one lidar-mount sweep (top view).

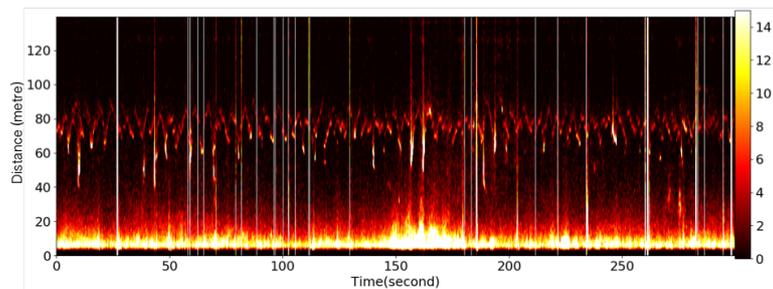


Fig.5 Sea wave observation experiment at Tokyo bay (Hanamigawa River Mouth). 11th Dec. 2017. Wind speed 14m/s, south east wind.

平成28年度には高速ホトンカウンタからのクロック信号に同期した擬似ランダム変調コードの生成を行い、そのトリガ信号でLEDパルス光を発振させるまでを行った。平成29年度ではまず、発振させる光強度を最適化させるための基礎実験を行った。これは一定周期(500kHz)のパルス発振をさせていた場合と比べ、擬似ランダム変調に変更したことでLEDに流す平均電流がCW発振に近づくため、パルスあたりの発光光量を制限する必要があることによる。結果として、パルスあたりの出力を0.5W(=5nJ/10ns相当の出力まで発振可能であった。この値をもとに、擬似ランダム変調のコード長、変調周波数、ならびに実質的な分解能、積算数の設計、検討を行った。実際のLEDライダーの仕様をもとにシミュレーションを作成し、先の擬似ランダム変調の仕様を最適化させて実装置への導入を図った。

一方で、LEDライダーによって局所大気・ガスの可視化を具現化すべく、送信光波長と同じ波長で計測するミーライダーと、特定ガスを対象としてガス種に応じて波長シフトしたラマン散乱光を計測するラマンライダーの2台で同期計測を行い、大気エアロゾル、窒素、水蒸気の時間応答、波浪及び表層大気の観測、ならびに人口竜巻発生装置での蒸気竜巻の計測を行った。動きのある計測対象を定点から観測、ならびに対象をスキャニングして計測し、局所大気・ガスの可視化を行った。いずれの計測も夜間ならびに人工照明下での計測である。これらの測定結果を現状の信号対雑音比とみなし、擬似ランダム変調の導入の効果を検討していく。

(3)平成30年度

擬似ランダム変調LEDライダーでは送受信の最適化を図るべく、符号長と個々のパルス幅、送信出力の関係に関して最適化を図った。Table 3 にその結果をまとめる。従来のパルス発光LEDライダーと比べて平均出力は11mWと大きくなった分、パルス幅も広がった(28ns)。LED駆動回路の許容電流を最大限利用しながら、これら条件を定めた。現状ではハードターゲットでのSN比向上は確認できたものの、Fig.1に示すような大気エコーのSN比改善は最適値を得るに至っていない。原因として、LEDドライバの電流許容量がボトルネックとなり、本来LEDが持つ定格電流値を大きく下回っていることにある。今後、LEDドライバの更新を行い、シミュレーション結果との比較を行っていく。

局所大気の可視化ではRaman LEDライダーによる表層大気と波浪の計測で興味深い結果を得た。表層大気として窒素Ramanエコーと波浪の水蒸気エコーを同期計測した際、それぞれの時間応答が異なる結果を得た(Fig.6)。これは波浪の動きに応じて大気が先んじて動いているように見える。現在実験を繰り返し、動的解析を進めている。水素ガスの定量計測では距離5mの計測で100%から1%までの濃度で水素Ramanエコーを評価することができた(Fig.7)。

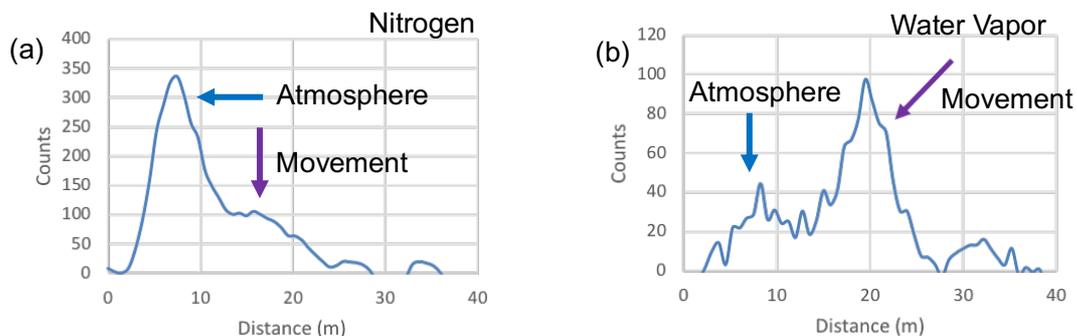


Fig.6 Surface atmosphere observation by LED Raman lidar. (a)Nitrogen Raman echo (b)Water vapor Raman echo.

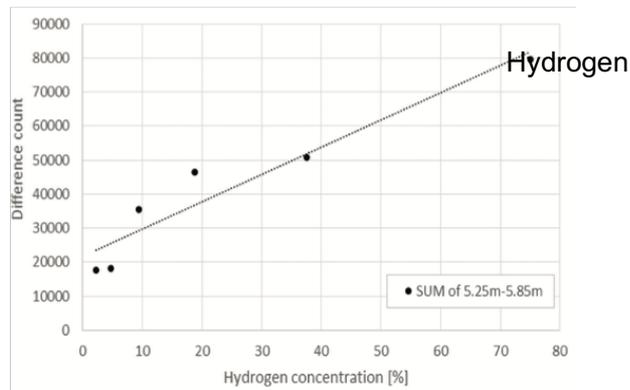


Fig.7 Hydrogen gas quantitative measurement by LED Raman lidar.

(4) まとめ

本研究では実環境を対象とした局所大気の可視化を目的として、LED ライダーの開発と実計測を進めてきた。擬似ランダム変調をLED ライダー送信光に導入することで日中観測を可能にすべく、技術の開発に取り組んだ。現状ではハードターゲットでのSN比向上は確認できたものの、大気エコーのSN比改善は最適値を得るに至っていない。原因として、LED ドライバの電流許容量がボトルネックとなり、本来LEDが持つ定格電流値を大きく下回っていることにある。今後、LED ドライバの更新を行い、シミュレーション結果との比較を行っていく。また、局所大気の可視化に関しては、LED Raman ライダーを開発し、従来のLED ライダーと同期計測を行うことで、表層大気の局所的な動きを捉え、可視化させることができた。大気水蒸気、波浪、人口竜巻等の観測を通して興味深い結果を得ることができた。今後は表層大気の動的な変化に追従した可視化技術へと発展させる予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ① Tatsuo Shiina, LED Mini Lidar for Atmosphere Application, Sensors, 19(3), 2019, pp. 569-582. DOI: 10.3390/s19030569
- ② 椎名 達雄, 千秋 博紀, 乙部 直人, はしもと じょーじ, 川端 康弘, ロボ搭載用LEDミニライダーの開発とダストの挙動観測, 日本リモートセンシング学会誌, 38(4), 2018, 317-324. DOI: 10.11440/rssj.38.38_4x1
- ③ 杉本 幸代, 朝日 一平, 椎名 達雄, ラマン分光法による局所水素ガス濃度非接触計測技術の開発, 電気学会論文誌C, 138(9), 2018, 1163-1168. DOI: 10.1541/ieejieiss.138.1163

〔学会発表〕(計 13 件)

- ① Tatsuo Shiina, LED BASED MINI RAMAN LIDAR FOR HYDROGEN GAS DETECTION, NSSE2018, 2018.
- ② Tatsuo Shiina et al., Distribution estimation of radioactivity concentration by compact polarization lidar in Fukushima, SPIE Remote Sensing 2018, 2018.
- ③ Tatsuo Shiina, Low Coherence Doppler Lidar with High-power DFB-LD, CLRC2018, 2018.
- ④ 椎名 達雄 他, ロボ搭載用LEDミニライダーによるダストの挙動観測, 第62回宇宙科学技術連合講演会, 2018. 他 8件

〔図書〕(計 2 件)

- ① Tatsuo Shiina et al. (Boualem Djezzar Eds.), Ionizing Radiation Effects And Applications, IntechOpen, 2018, 186(41-60).
- ② Tatsuo Shiina et al. (Nikolay Britun and Anton Nikiforov Eds.), Photon Counting - Fundamentals and Applications, IntechOpen, 2018, 296(243-259).

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし
- (2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。