

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282115

研究課題名(和文) 局地的大雨予測のための可搬性に優れた次世代型水蒸気ライダーの開発

研究課題名(英文) Development of field deployable next generation water vapor lidar for heavy rain prediction

研究代表者

酒井 哲 (SAKAI, Tetsu)

気象庁気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官

研究者番号：00377988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：局地的大雨をより早い時間に正確に予測するために、大雨をもたらす源となる水蒸気濃度の高度分布を連続的に観測する、小型で可搬性に優れた水蒸気ライダーの開発を行った。開発した水蒸気ライダーの特徴は、送信部に半導体レーザーとアンプを使用することにより、小型で軽量の点である。この装置を用いて2016年夏季に東京で試験観測を行った結果、夜間は高度0.6～3 km、昼間は高度0.6～1.3 kmの水蒸気分布を、高度分解能10分・時間分解能150 mで連続的に観測できることが分かった。また、約1ヶ月間の連続観測を行い、装置が安定に動作することを確認した。

研究成果の概要(英文)：For early prediction of localized heavy rainfall that can cause extensive damages, we have developed a compact lidar that continuously measures the vertical distribution of water vapor density in the lower troposphere. The lidar is compact and light weight by employing a laser diode and amplifier for the transmitter. The result of test measurements in the summer of 2016 in Tokyo showed that it can measure the vertical distribution of water vapor between 0.6 and 3 km in night and 0.6 and 1.3 km in day with temporal resolution of 10 minutes and vertical resolution of 150 m. The lidar is shown capable of continuous operation over a month.

研究分野：大気科学

キーワード：局地的大雨 水蒸気 リモートセンシング ライダー

### 1. 研究開始当初の背景

近年、都市域において局所的な集中豪雨が発生しており、その被害は甚大である。その被害を軽減するために、数値天気予報モデルを用いた予測が試みられている。しかしながら、今のところその予測精度とリードタイムは不十分である。その理由の一つは、大雨をもたらす風上側の水蒸気分布観測データが不足していることである。水蒸気は、大雨をもたらす積乱雲を形成する雲粒の源であるため、積乱雲が発達する前段階の風上側で、水蒸気を多く含む空気の流入を捉えることができれば、大雨の前兆を捉えることができる。しかし、水蒸気高度分布を機動的に連続モニタリングする方法は今のところない。

そこで本研究では、小型で移動が可能な水蒸気分布測定用ライダー(レーザ・レーダ)を開発し、その性能を検証することにした。これで水蒸気分布の連続モニタリングが可能になれば、大雨予測に重要な情報が得られることになる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、小型で可搬性に優れた水蒸気ライダーを、世界で初めて開発することである。具体的な目標は以下の通りである。

- ・ 半導体レーザを用いた小型の送信部と受信部を開発する。
- ・ 上記の送受信部を組み合わせて水蒸気ライダーを製作する。
- ・ 水蒸気ライダーと気象観測気球との比較観測をおこない、水蒸気測定データを検証する。

以上の研究により、局地的大雨の前兆を捉える水蒸気ライダーを開発し、検証を行う。

### 3. 研究の方法

水蒸気ライダーの開発計画は以下の通りである。

- ・ 局地的大雨予測に必要なライダーの性能(測定高度範囲、時間分解能、測定精度)の決定(1年目)
- ・ 大雨予測の要求を満たすための装置シミュレーションと装置設計(1年目)
- ・ 送信レーザの予備実験とライダー送信部・受信部の開発(1~2年目)
- ・ ライダーシステムの統合および試験観測、装置の改良(2~3年目)
- ・ ラジオゾンデとの比較観測による検証実験(2~3年目)

これらの内容を、ライダー装置を開発する研究者と数値予報モデル研究者が密に意見交換をしながら開発をすすめる。

### 4. 研究成果

#### (1) 研究の主な成果

本研究では、水蒸気の高高度分布を連続的に観測する、小型で可搬性に優れた水蒸気ライダーの開発を行った。

開発した水蒸気ライダーの特徴は、送信系に半導体レーザとアンプを使用することにより、小型(縦横幅 40 x 45 cm、高さ 115 cm)で軽量(約 100 kg)な点である。この装置を用いて 2016 年夏季に東京で試験観測を行った。その結果、夜間は高度 0.6~3 km、昼間は高度 0.6~1.3 km の水蒸気分布を、高度分解能 10 分・時間分解能 150 m で連続的に観測できることが分かった。また、約 1 ヶ月間の連続観測を行い、装置が安定に動作することを確認した。

#### (2) 水蒸気ライダーの測定原理

本研究で開発した水蒸気ライダーは、差分吸収式(Differential Absorption lidar, DIAL)である。その測定原理を以下に述べる。

ライダー送信部から、水蒸気の吸収係数が異なる 2 つの波長(829.054 nm と 829.124 nm)のレーザ光をパルス状に大気中に射出する。射出した光が大気中の気体分子や液体・個体微粒子(エアロゾル)によって後方散乱された光を、受信部にある望遠鏡で集光する。望遠鏡で集光した光を、干渉フィルターを通してレーザ光の波長成分のみ取り出して光電子増倍管で検出し、その強度を測定する。測定した散乱光強度の高度分布と、2 波長での水蒸気の吸収係数の差から、水蒸気濃度の高度分布が得られる。この方式の長所は、送信レーザとして、太陽光の影響が小さい波長のレーザを使うことで、昼間の最大観測高度が高い点、また水蒸気の吸収係数が既知であれば校正が必要ない点である。短所は、送信レーザの波長を 0.1 pm の精度で制御する必要があるため、今のところ装置の取り扱いに熟練が必要な点、装置が振動等に弱い点である。

#### (3) 開発した水蒸気ライダー

図 1 と 2 に水蒸気ライダーの模式図と写真、表 1 に諸元を示す。

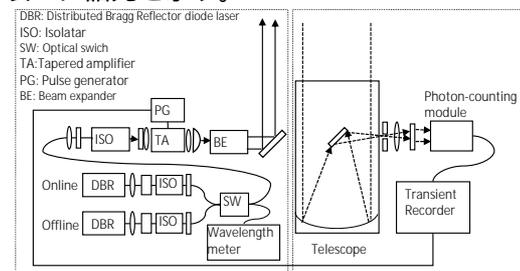


図 1: 水蒸気ライダーの装置構成図

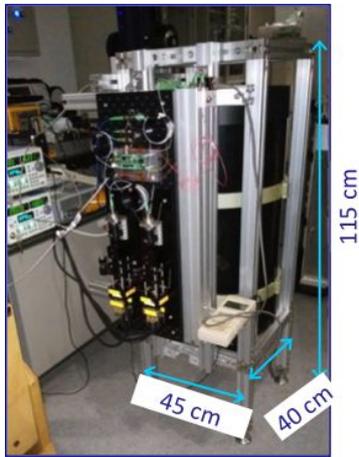


図 2：水蒸気ライダーの写真

表 1：水蒸気ライダー諸元

Transmitter:	
Laser	DBR diode laser x2 (seed laser)+TSOA (Tapered semiconductor optical amplifier)
Wavelength	829.124 nm (Off-line) 829.054 nm (On-line)
Pulse Energy	4 μJ
Repetition	10 kHz
Receiver:	
Telescope	Cassegrain
Diameter	35 cm
Field of View	0.25~2.8 mrad (adjustable)
Detector	PMT
Operation	Photon Counting
Interference filter	
Center wavelength	829.11 nm
FWHM	0.275 nm
Transmission	47%

開発したライダーの特徴は、送信部に半導体レーザー (Distributed Bragg Reflector laser) と半導体アンプ (Tapered Amplifier) を使用することにより、装置が小型 (縦横幅 40×45 cm、高さ 115 cm) で軽量 (約 100 kg) な点である。また、この送信部は、従来のライダーで主に用いられてきたフラッシュランプ励起の固体レーザーを使用したものに比べて小型・静音で、メンテナンスの頻度も少なくて済むことが利点である。

#### (4) 試験観測結果

図 3 に 2016 年 8 月 26 日にライダーで観測した水蒸気混合比の高度分布を示す。観測場所は首都大学東京 (東京都日野市) である。データの時間分解能は 20 分、高度分解能は 75 m (高度 1 km 以下)・150 m (1 km 以上) である。比較検証のために同時刻における気象庁メソ客観解析データも示す。計画当初の予定では、検証データとしてラジオゾンデデータを用いる予定であったが、開発が遅れたため、装置をラジオゾンデ観測を行っているつくばに移動することができなかつたので、メソ解析データと比較することにした。

ライダー観測データを見ると、夜間は高度 0.6~3 km、日中は 0.6~1.3 km の範囲でメソ解析データとほぼ対応していること

が分かる。なお、図には信号強度から見積もられる測定誤差が 30% 以下のデータのみプロットしている。

図 4 に同日の 24 時間の連続観測結果を示す。午前 9 時以降の大気下層 (高度 0.5~1 km) に、水蒸気混合比が高い (12 g/kg 以上) 領域があることが分かる。局地的大雨をもたらす積乱雲は、この高度付近にある水蒸気を多く含んだ空気が、水平方向に収束し対流が発生することによって形成される。したがって、このような水蒸気分布を積乱雲が発生する前の風上で捉えることができれば、積乱雲発生 of 早期予測に貢献することができると考えている。

観測可能な高度について見ると、夜間 (午前 5 時以前と 18 時以降) は高度 3 km まで観測データが得られているが、日中 (5 時~18 時頃) は、観測高度が 1 km 以下に低下している。この結果は、開発前に行っていた装置シミュレーション結果に比べて最大観測高度が 1~2 km 低かった。この原因は、レーザーの光軸調整が不完全なために出力が不十分なこと、受信光の検出波長幅が広いために太陽背景光ノイズの影響が大きいためである。現在これらの対策を取り、観測高度範囲を広げるための改良を進めている。

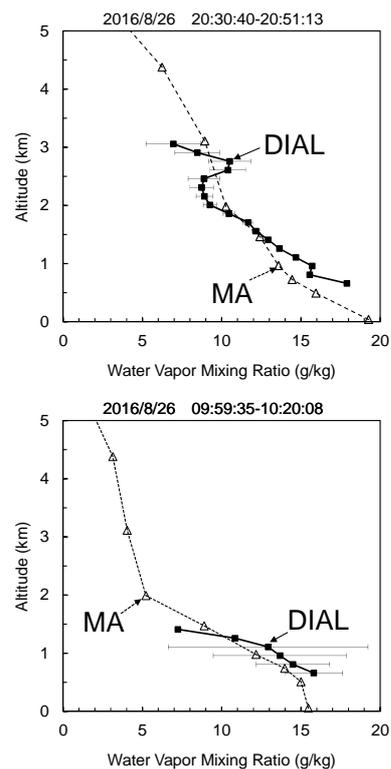


図 3：2016 年 8 月 26 日の夜間 (上) と日中 (下) に水蒸気ライダー (DIAL) で観測した水蒸気混合比の鉛直分布 ( ) は同時刻の気象庁メソ解析データ (MA)。

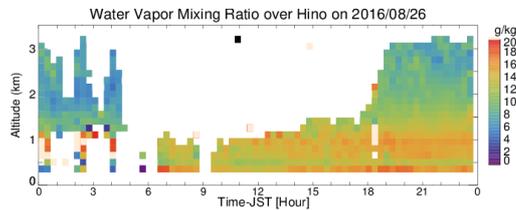


図4：2016年8月26日に水蒸気ライダーで連続観測した水蒸気混合比の時間-高度断面図（測定誤差30%以内のみプロット）。高度0.5～1 kmに水蒸気混合比の高い領域が分布していることが分かる。

(5) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究で開発した、半導体レーザーを用いた小型の水蒸気ライダーは国内初のものである。このレーザーを利用したライダーは、小型で軽量かつメンテナンス性に優れるため、今後大気観測用途での普及が進むと思われる。しかし、装置を移動した後に、素早く観測を開始することができるようためには、耐振動性能や耐環境（温度・湿度等）性能を高める必要がある。アメリカでは、同タイプの可搬型水蒸気ライダーがすでに開発されており、フィールドでの長期観測に成功している。これに追いつき追い越せるように、装置改良を今後進める。

(6) 今後の展望

装置の耐振動性能・耐環境性能を高める改良を行った上で、局地的大雨が発生する夏季に東京都心部において集中観測を行う。観測データを気象数値モデルに同化して、予報精度へのインパクトを調べる。

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)

Phong Pham Le Hoai, Makoto Abo, Tetsu Sakai, 2016, Development of field-deployable Diode-laser-based water vapor DIAL, EPJ Web of Conferences, 査読有, 119, 05011, doi: 10.1051/epjconf/20161190501.

Phong Le Hoai Pham and Makoto Abo, 2014, Diode laser based water vapor DIAL using modulated pulse technique, Proc. SPIE 9262, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XIV, 査読有, 926208 (November 17, 2014), doi:10.1117/12.2069143.

[学会発表](計14件)

局地的大雨予測のための小型水蒸気ライダーの開発：ラマン方式と差分吸収方式

の比較, 酒井 哲, 阿保 真, 永井智広, 泉 敏治, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 内野 修, 柴田泰邦, 長澤親生, 第42回リモートセンシングシンポジウム, 千葉大学(千葉県・千葉市) 2017年3月8日

局地的大雨予測のための小型水蒸気ライダーの開発：ラマン方式と差分吸収方式の比較, 酒井 哲, 阿保 真, 永井智広, 泉 敏治, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 内野 修, 柴田泰邦, 長澤親生, 第21回大気ライダー研究会, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス(東京都・台東区), 2017年2月14日

Measurements of water vapor profiles with compact and mobile lidars for local heavy rainfall prediction, Tetsu Sakai, Makoto Abo, Tomohiro Nagai, Toshiharu Izumi, Osamu Uchino, Hiromu Seko, Takuya Kawabata, Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa, 2016 AGU Fall Meeting, Moscone Convention Center (サンフランシスコ(アメリカ)), 2016年12月14日

局地的大雨予測のための可搬性に優れた次世代型水蒸気ライダーの開発(2), 酒井 哲, 阿保 真, Phong Pham Le Hoai, 菊田達也, 永井智広, 内野修, 泉敏治, 柴田泰邦, 長澤親生, 瀬古弘, 川畑拓矢, 日本気象学会2016年度秋季大会, 名古屋大学(愛知県・名古屋市, 2016年10月28日) 局地的大雨予測のための可搬性に優れた次世代型水蒸気ライダーの開発(2), 酒井 哲, 阿保 真, 永井智広, 泉 敏治, 内野 修, 柴田泰邦, 長澤親生, 瀬古 弘, 川畑拓矢, 第34回レーザーセンシングシンポジウム, 野沢温泉スパリーナコンベンションホール(長野県・下高井郡) 2016年9月9日

局地的大雨予測のための水蒸気 DIAL, 阿保真, 菊田達也, Phong Pham Le Hoai, 酒井哲, 第20回大気ライダー研究会, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス(東京都・台東区) 2016年2月16日

(招待講演)Development of ground-based lidars for measuring H2O and O3 profiles in the troposphere, Tetsu Sakai, Makoto Abo, Phong Pham Le Hoai, Osamu Uchino, Tomohiro Nagai, Toshiharu Izumi, Isamu Morino, Chikao Nagasawa, 2015 AGU Fall Meeting, Moscone Convention Center (サンフランシスコ(アメリカ)), 2015年12月15日

局地的大雨予測のための可搬性に優れた次世代型水蒸気ライダーの開発, 酒井哲, 阿保真, Phong Pham Le Hoai, 永井智広, 内野修, 泉敏治, 柴田泰邦, 長澤親生, 瀬古弘, 川畑拓矢, 日本気象学会2015年度秋季大会, 京都テルサ(京都府・京都市) 2015年10月28日

局地的大雨予測のための水蒸気 DIAL による水平スキャン観測の検討, 菊田達也,

Phong Pham Le Hoai, 阿保真、大田区産業プラザ P10 コンベンションホール(東京都・大田区)、2015年9月10日

Field Deployable diode-laser-based water vapor DIAL with modulated pulse technique: preliminary results, Phong Pham Le Hoai, Makoto Abo, Tetsu Sakai、大田区産業プラザ P10 コンベンションホール(東京都・大田区)、2015年9月10日

Development of field deployable DIAL, Phong Pham Le Hoai, Makoto Abo, Tetsu Sakai, 27th International Laser Radar Conference, City College of New York (ニューヨーク(アメリカ)), 2015年7月8日

局地大雨予測のための機動観測用水蒸気ライダーの開発、酒井哲、永井智広、泉敏治、内野修、瀬古弘、川畑拓矢、阿保真、Phong Pham、柴田泰邦、長澤親生、第40回リモートセンシングシンポジウム、リモート・センシング技術センター(東京都・港区)、2015年3月2日

(招待講演)都市大気遠隔稠密観測用ライダーの開発、阿保真、菊田達也、有賀幸輝、Phong Le Hoai Phong、日本地球惑星科学連合2015年大会、幕張メッセ(千葉県・幕張市)、2015年5月25日

局地大雨予測のための機動観測用水蒸気ライダーの開発、酒井哲、阿保真、永井智広、泉敏治、内野修、柴田泰邦、長澤親生、瀬古弘、川畑拓矢、第32回レーザセンシングシンポジウム、高山市民会館(岐阜県・高山市)、2014年9月5日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

酒井 哲 (SAKAI, Tetsu)  
気象庁 気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・主任研究官  
研究者番号：00377988

### (2) 研究分担者

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

永井 智広 (NAGAI, Tomohiro)  
気象庁 気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・室長  
研究者番号：30343891

### (3) 連携研究者

瀬古 弘 (SEKO, Hiromu)  
気象庁 気象研究所・予報研究部・室長  
研究者番号：0354445

川畑 拓矢 (KAWABATA, Takuya)

気象庁 気象研究所・予報研究部・主任研究官

研究者番号：80354447

長澤 親生 (NAGASAWA, Chikao)  
首都大学東京・システムデザイン研究科・客員教授

研究者番号：80145664

柴田 泰邦 (SHIBATA, Yasukuni)  
首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：10305419

### (4) 研究協力者

内野 修 (UCHINO, Osamu)  
気象庁 気象研究所・気象衛星・観測システム研究部・客員研究員