

水蒸気・風速同時計測向け コヒーレント方式差分吸収ライダー

今城勝治*
Masaharu Imaki
田中久理†
Hisamichi Tanaka
廣澤賢一*
Kenichi Hirotsawa

柳澤隆行†
Takayuki Yanagisawa
亀山俊平‡
Shumpei Kameyama

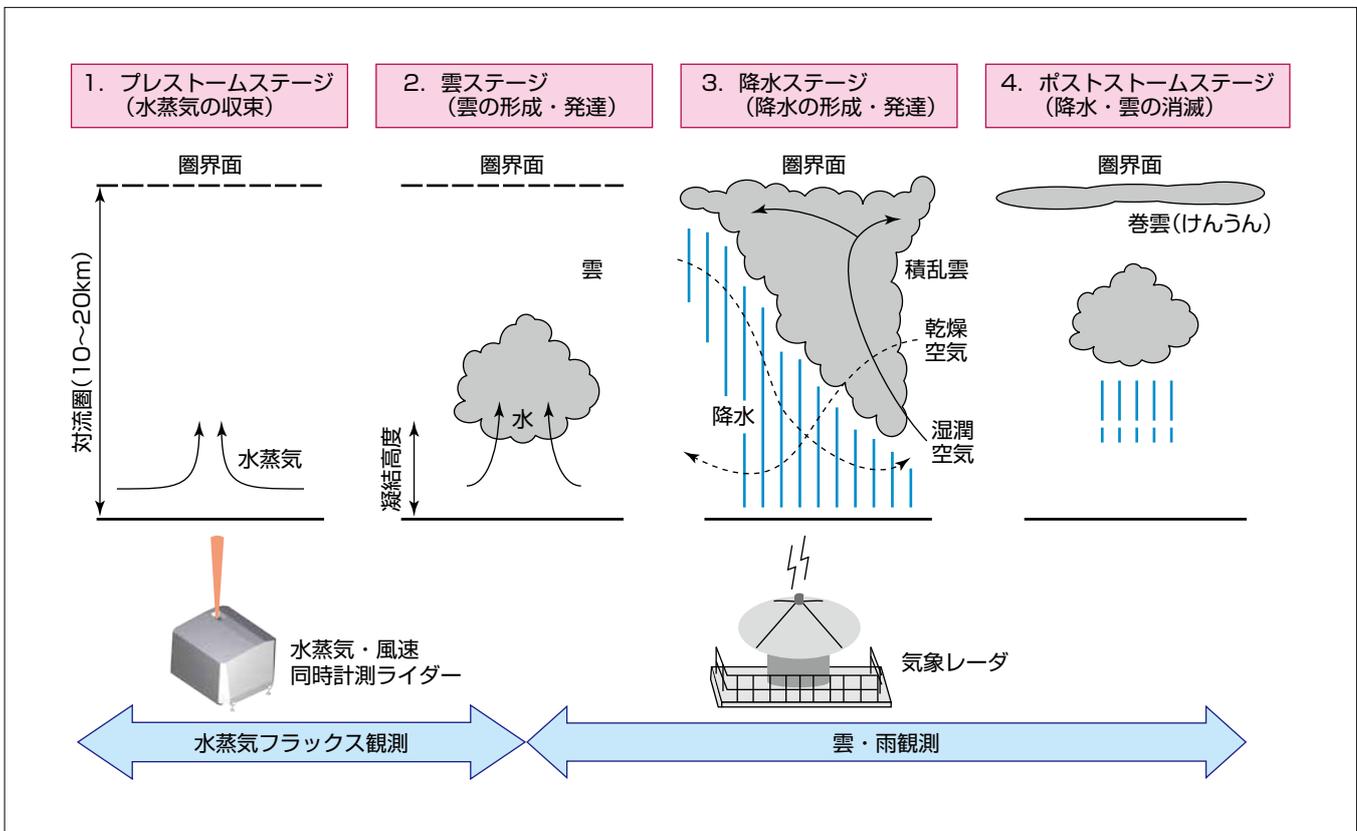
Coherent Differential Absorption LIDAR for Simultaneous Measurement of Water Vapor and Wind Velocity

要旨

豪雨による洪水や土砂崩れといった災害による被害が世界中で増加しており、その対策が求められている。特に、集中豪雨やゲリラ豪雨は、雲が発生してから短時間で集中的に降雨が発生し、豪雨発生箇所以外にも広域に被害が発生するため、インフラ面での対応策に加え、豪雨予測の高精度化や被害予測、安全に避難する時間の確保が課題となっている。

高精度豪雨予測の一つとして、降雨の種となり得る水蒸気フラックスを把握し、実測データをデータ同化して気象数値モデルで予測する手法が研究されている⁽¹⁾。さらに、ライダー(Light Detection and Ranging: LIDAR)を用いて水蒸気量や風速分布を測定し、水蒸気フラックスを高精度・高分解能に把握する手法が報告されている⁽²⁾。しか

し、使用されている従来の水蒸気計測ライダーの光検出手法では、受信光の光量から算出するため、背景光量に依存して測定高度が変化する課題がある。そこで、ローカル光と受信光をヘテロダイン検波し、光の干渉性を利用した水蒸気計測向けコヒーレント方式差分吸収ライダーを開発した。この方式では、太陽光のようなランダム位相の背景光はローカル光と干渉しないため、受信信号には信号成分だけ抽出でき、背景光量に依存することなく昼夜安定して計測できる。さらに、受信光の位相情報からドップラーシフト周波数を算出することによって風速分布も同時に計測できることが特長である⁽³⁾。この装置によって、高精度豪雨予測を可能にして、被害を最小限に抑えることのできる防災・減災社会への貢献を目指す。



水蒸気・風速同時計測ライダーと気象レーダを用いた高精度豪雨予測向け観測システムのイメージ

水蒸気・風速同時計測ライダーで降水の要因となる雲になる前の水蒸気密度の増加や上昇気流を観測し、気象レーダで雲や降雨を観測する。雲が発生する前から大気の状態を把握することで、早期の豪雨予測を目指す。

ライフ

インダストリー

インフラ

モビリティ

共通領域

1. ま え が き

ライダーは、大気中に照射したレーザ光に対する空気分子やエアロゾルからの散乱光を集光・検出し、レーザ発光からの遅延時間に基づく受信光量や位相情報の変化を基に、風速や分子濃度、エアロゾル濃度などの空間分布を測定する光波レーダである。三菱電機は、水蒸気と風速の同時計測を実現するための1.5 μm 帯コヒーレント方式差分吸収ライダーを開発した。

2. 水蒸気・風速計測同時計測ライダー

2.1 装置構成

1.5 μm 帯コヒーレント方式差分吸収ライダーの装置構成を図1に示す。水蒸気に対する吸収波長は、1.5 μm 帯の中でも吸収強度が強く、温度特性の小さい1,531.383nmを選定し、非吸収波長は1,531.555nmを選定した⁽³⁾。それぞれの波長に後述する波長ロック回路で安定化したレーザ光を光スイッチで選択した後、レーザ光を光分配器で分け、一方を強度変調器でパルス化して光アンプで増幅した後、光アンテナを通して大気中に照射する。大気中に照射したレーザ光に対する空気分子やエアロゾルでの散乱光を光アンテナで集光し、光分配器のもう一方の光と合波する。合波した光をバランスド検出し、信号処理機で所定の時間領域ごと(=距離ごと)での周波数解析を行う。

吸収波長の受信強度は、非吸収波長の受信強度に対して、水蒸気量の吸収分だけ減衰するため、吸収波長と非吸収波長のレーザ光を交互に照射し、その受信強度の差分からその領域の水蒸気量を算出できる。また、大気中に浮遊しているエアロゾルは風の流れとともに移動するため、その散

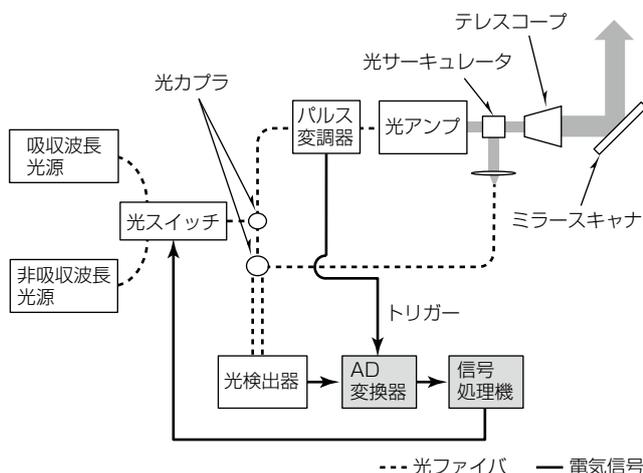


図1. コヒーレント方式差分吸収ライダーの装置構成⁽³⁾

乱光にはドップラーシフトが発生する。したがって、非吸収波長のピーク周波数から視線方向の風速値を測定できる。さらに、スキャナ等によってビームを走査し、角度ごとの水蒸気分布や風速分布として取得することで、三次元分布の測定が可能になる。

2.2 コヒーレント方式差分吸収ライダーの要素技術

2.2.1 波長ロック回路

吸収波長光源に対しては光波長に対して7桁小さい0.1pmオーダーの安定度が求められる。この値を実現するため、測定対象のガスを封入したセルを用い、吸収スペクトルに吸収波長光源の波長を安定化させることが必要である。

1.5 μm 帯での水蒸気の吸収強度は小さく、長さ10cmの光路長では透過率99.95%程度と、十分な吸収量を得ることができない。そこで、1.5 μm 帯に強い吸収のあるシアン化水素(HCN)の吸収線に波長を安定化させ、さらに安定化した光源と水蒸気の吸収波長光源とのビート周波数が所定の周波数になるように制御することで、水蒸気の吸収波長に安定化させる回路を開発した⁽⁴⁾。図2に波長ロック回路の構成を示す。この回路で波長安定化を行った結果、水蒸気の吸収波長1,531.383nmに対して、長期安定度として標準偏差0.123pmの波長安定化光源を実現できた。一方、非吸収波長に対しては、温度制御とレーザダイオードに流す電流制御だけで安定化した。

2.2.2 受信強度・ピーク周波数演算

水蒸気分布を米国標準大気モデル1976と仮定した場合、差分距離100mとしたときの吸収波長と非吸収波長の差分は、地上から高度3km付近で0.015~0.03dB程度である。この差分条件に対して水蒸気量を誤差10%で計測するには、吸収波長と非吸収波長に対する受信信号の受信信号対雑音比(受信SN比)は、約30dBが必要になる⁽³⁾。

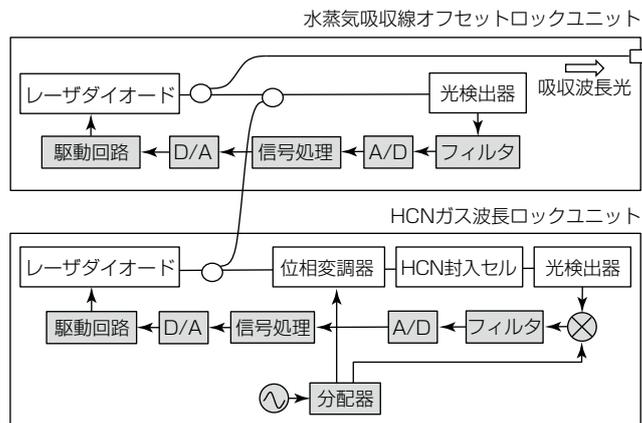


図2. 波長ロック回路の構成⁽⁴⁾

コヒーレント方式ライダーで周波数解析した受信スペクトルは、レーザ線幅や乱流等によってその線幅が広がる。つまり、受信スペクトルのピーク値だけでの測定では、水蒸気量算出時の誤差の要因になる。そのため、この装置では複数の周波数ビンでの受信振幅を加算して受信強度を算出することで、乱流等によって受信スペクトルが広がった場合でも高精度な受信強度の算出ができるように対策した。また、ドップラー周波数算出についても、ピーク値の周辺での1次モーメントからピーク周波数を算出している⁽⁵⁾。

3. 水蒸気・風速分布の観測例

図1の装置を作製し、鎌倉市大船にある当社情報技術総合研究所で連続観測を実施した。ライダーで取得した水蒸

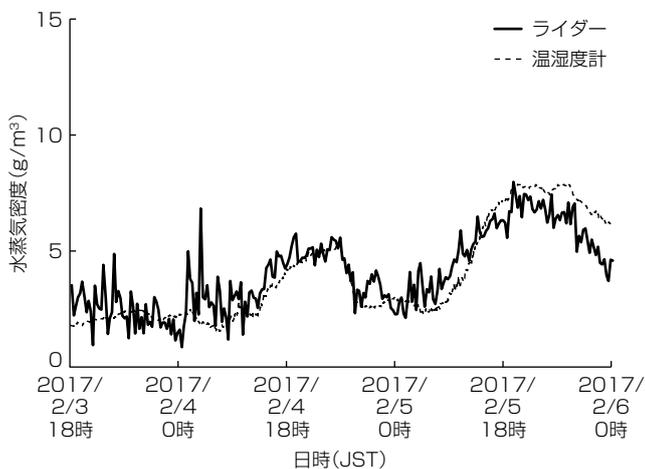


図3. ライダーと温湿度計の水蒸気測定値比較⁽⁶⁾

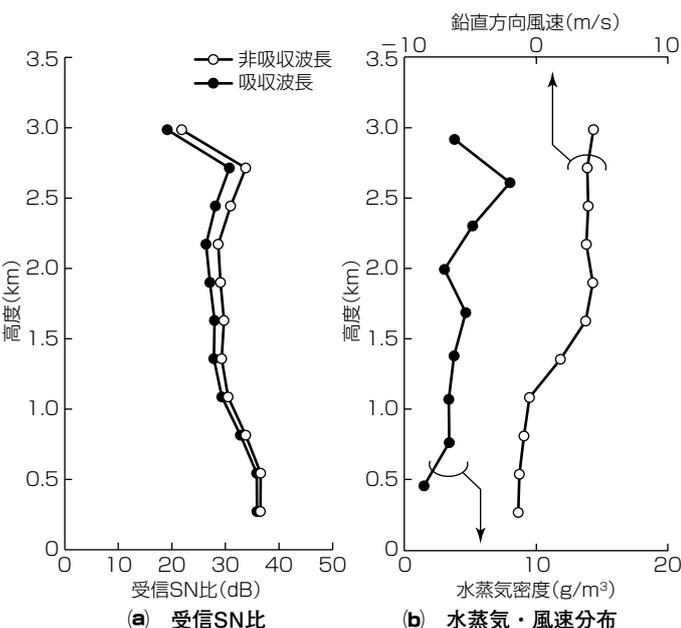


図4. ライダーで取得した受信SN比と水蒸気・風速分布の例

気密度の妥当性を検証するため、水平方向に照射して取得したライダーの第1レンジの水蒸気測定値と、観測地点に設置した温湿度計から算出した水蒸気測定値の時間変化特性を比較した。2017年2月3日18時から2月6日0時の観測結果を図3に示す。水蒸気量の時間変化が両機器で一致していることを確認した⁽⁶⁾。

図4に、2018年3月30日に取得した水蒸気・風速の鉛直分布を示す。図中、(a)は受信SN比、(b)は水蒸気分布と鉛直方向風速分布である。レーザ光は天頂角35.4度に照射し、取得したデータを高度方向の分布に変換している。(a)の受信SN比はエアロゾル濃度に依存しており、高度2.8kmにエアロゾル濃度が高くなっている層があることが分かる。また、その下層部で、(b)の水蒸気密度が増加している様子を観測できた。風速分布については、正の値が下降気流で負の値が上昇気流を示しており、対流が発生している様子を観測できた⁽⁷⁾。

4. むすび

高精度豪雨予測で被害を最小限に抑えることを目指して、水蒸気フラックスを高精度・高分解能に把握するための水蒸気・風速同時計測向けコヒーレント方式差分吸収ライダーを開発し、水蒸気と風の同時計測を実施した。この装置では、別途開発した光導波路増幅器⁽⁸⁾を光アンプに用いることで、広域での観測を実施することも可能である。

今後は、ライダー取得データ水蒸気フラックスを算出し、その値を数値予測シミュレーションに反映した豪雨予測技術の開発に取り組む予定である。

参考文献

- (1) Nelman, P., J. et al.: A water vapour flux tool for precipitation forecasting, *Water Management*, **162**, 83~94 (2009)
- (2) Giez, A., et al.: Water vapor flux measurements from ground-based vertically pointed water vapor differential absorption and Doppler lidars, *Journal of Atmospheric And Oceanic Technology*, **16**, 237~250 (1999)
- (3) Imaki, M., et al.: Wavelength selection and measurement error theoretical analysis on ground-based coherent differential absorption lidar using 1.53μm wavelength for simultaneous vertical profiling of water vapor density and wind speed, *Applied Optics*, **59**, 2238~2247 (2020)
- (4) Imaki, M., et al.: Development of wavelength locking circuit for 1.53 micron water vapor monitoring coherent differential absorption LIDAR, in *Proc. of ILRC28* (2018)
- (5) 今城勝治, ほか: レーザレーダ装置, 特許第6505343号
- (6) 今城勝治, ほか: 1.53μm帯コヒーレント差分吸収ライダーによる水蒸気分布の計測結果, 第35回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2017)
- (7) 今城勝治, ほか: コヒーレント差分吸収ライダーによる水蒸気・風分布の同時計測結果, 第36回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (2018)
- (8) Hirose, K., et al.: 7.4mJ laser amplifier at 1531.4nm for water vapor differential absorption lidar (DIAL), in *Conference of Advanced Solid State Lasers 2017*, JTh2A 23 (2017)