

豪雨発生場所の予測精度向上を目指して

～差分吸収ライダーによる水蒸気量観測～

豪雨災害の防災・減災を目指し、大気中の水蒸気の流れを計測する波長 $2\mu\text{m}$ 帯を利用した差分吸収ライダーの開発研究を進めている。本稿では、水蒸気量と風速を同時に観測できる差分吸収ライダーのしくみ、観測に用いる装置の概要、得られた観測結果、さらに超伝導検出器を活用した新しい取り組みについて紹介する。

国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT)
電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター
リモートセンシング研究室
主任研究員 青木 誠、研究員 大久保 洸祐



差分吸収ライダーによる水蒸気測定精度検証のために
気球に取り付けたラジオゾンデ（気象センサー）を放球する様子

はじめに

近年、線状降水帯や台風に伴う激しい雨が全国各地で頻繁に発生し、毎年のように大きな被害をもたらしている。都市部や山間部では、短時間に集中する雨により浸水や土砂災害が急速に広がり、人的・経済的な損失が大きくなっている。気象衛星やレーダー観測網の整備、数値予報モデルの高度化により、台風や前線といった広域的な現象の予測精度は向上してきた。しかし、数キロメートル以下のスケールで突発的に発生する積乱雲による局地的豪雨、いわゆる「ゲリラ豪雨」や竜巻の予測は、現在も難しい状況にある。

積乱雲の発生には、地表付近の湿った空気が風によって集まり、上昇気流によって上空に持ち上げられる過程が関与している。このため、降雨前の大気中の水蒸気の分布や流れを詳しくつかむことが、豪雨の兆候をとらえる上で重要であると考えられている。しかしながら、水蒸気の三次元分布とその動きを同時に高精度で観測できる方法はまだ限られており、数値予報モデルに十分な初期値情報を与えるには至っていないのが現状である。

こうした課題に対して、情報通信研究機構 (NICT) では赤外線レーザーを用いたリモートセンシング技術の一つである差分吸収ライダー (DIAL) を発展させ、風と水蒸気を同時に観測できる新しいタイプの差分吸収ライダー (MP-DIAL) の研究開発を進めている。

MP-DIAL は昼夜を問わず広い範囲を高分解能で観測でき、積乱雲の発生に先立つ水蒸気の収束や上昇流の兆しをリアルタイムでとらえることが可能である。本稿では、

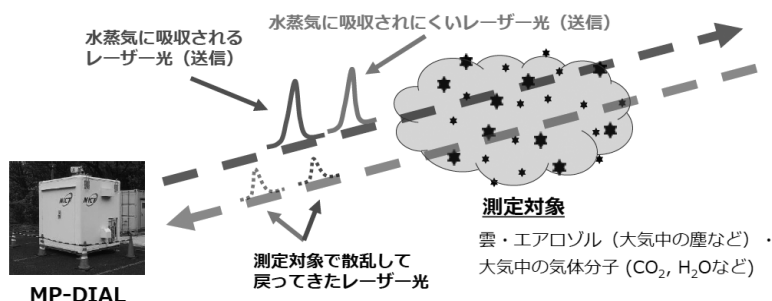
MP-DIAL の原理や観測装置、観測事例に加え、超伝導検出器を使った新たな技術の展開について紹介する。

水蒸気の流れを計測する技術

図 1 に、MP-DIAL による風と水蒸気の計測原理を示す。NICT が開発を進めている MP-DIAL は、目に対する安全性が高く、水蒸気の観測に適した波長である $2\mu\text{m}$ 帯の赤外線レーザー^{*1}を使用しており、地表付近の生活空間に近い場所でも安全に観測できる。

光送信機には固体パルスレーザーを採用しており、高いパルスエネルギーと高い繰り返し速度を両立させることで、長距離にわたる風と水蒸気の同時観測を可能としている。MP-DIAL は、大気中の微小粒子（エアロゾル）や雲で散乱されたレーザー光（散乱光）が

^{*1} $2\mu\text{m}$ 帯を含む、波長 $1.4\mu\text{m}$ から $2.6\mu\text{m}$ までの赤外線レーザーは、眼に損傷を与えにくいため、アイセーフレーザーと呼ばれる



1. レーザー光が戻ってくる時間 → 測定対象までの距離
2. レーザー光の周波数の変化 → 測定地点の風速
3. 2 種類のレーザー光の強度の差 → 測定地点の水蒸気量

図 1 MP-DIAL による風と水蒸気の計測原理

戻ってくるまでの時間（Time of flight）から、対象までの距離を求める。

さらに、散乱光の周波数変化（ドップラー効果）を利用するコヒーレントライダーの原理を応用することで、視線方向の風速を高精度に計測できる。大気の状態や雲の有無によって観測範囲は変わるが、水平方向ではおおむね 15km 以上、垂直方向では地上から 1～2km 程度の対流圏境界層内で風速分布の観測が可能である。

一方、水蒸気量の計測には、吸収特性の異なる 2 波長のレーザー光（吸収波長と非吸収波長）を用いた差分吸収ライダー（DIAL）の原理を用いている。2つのレーザー光を大気に照射し、散乱光の強度の減衰量を解析することで、水蒸気による吸収量を求め、その空間分布を定量的に把握できる。

MP-DIAL の構成と観測波長

図 2 に、MP-DIAL の構成を示す。送信系は、安定した単一波長の連続光を出すシードレーザー^{*2}、観測に適した波長に調整する波長制御装置、そして制御されたシード光を同期光源として用いるパルスレーザー^{*3}から構成されている。MP-DIAL の将来的な実用化に向け、NICT ではこれらの装置の高性能化および安定動作化に関する研究開発を進めている。特にシードレーザーに関しては、従来使用していた市販品が高価で入手性に乏しく、任意波長への調整が困難であるという課題があったが、現在では、NICT においてより低コストかつ波長可変性を有するレーザーデバイスの開発に成功している（表紙の中央左の図：MP-DIAL に使われる NICT 独自開発の波長 2μm 帯のレーザーデバイス）。

水蒸気量を高精度に計測するためには、吸収波長（ λ_{on} ）と非吸収波長（ λ_{off} ）の選定が非常に重要である。図 3 に示すように、波長 2051nm 付近には水蒸気と CO₂ の吸収が存在する。この特性を踏まえると、以下の条件を満たす波長選定が求められる。

- ① 水蒸気の吸収断面積の差が大きい → 計測精度の向上につながる
- ② CO₂ の吸収断面積の差が小さい → CO₂ の吸収の影響を低減できる
- ③ 気圧や気温変動に対する感度が低い → 高度にかかわらず安定して測定できる

^{*2} 観測の基準となる正確な周波数で発振するレーザーのことを指す

^{*3} より遠くまで、より短時間で計測するために、短時間に大出力が得られるレーザーのことを指す

これらの条件を満たす波長として、 $\lambda_{on} = 2050.550\text{nm}$ 、 $\lambda_{off} = 2051.103\text{nm}$ を採用している。

さらに、計測精度を確保するには、レーザー光の波長を高精度かつ安定的に制御する必要がある。シードレーザー（Tm,Ho:YLF レーザー）は、フリーランニング状態では時間とともに波長が約 5pm/day 変動する。しかし、水蒸気計測で系統誤差を 5% 以下に抑えるには、 λ_{on} の波長変動を 0.2pm 以内に制御する必要がある。

この課題に対して、NICT では CO₂ の吸収線を基準にした Pound-Drever-Hall 法^{*4}を応用した新しい波長制御手法を開発した [1]。具体的には、基準波長（ $\lambda_{center} = 2050.967\text{nm}$ ）を設定し、電気光学変調器で生成される側帯波に λ_{on} および λ_{off} を位相同期させることで、シードレーザーの発振波長を高精度かつ安定的に制御している。この技術により、MP-DIAL に必要な計測精度を確保することに成功している。

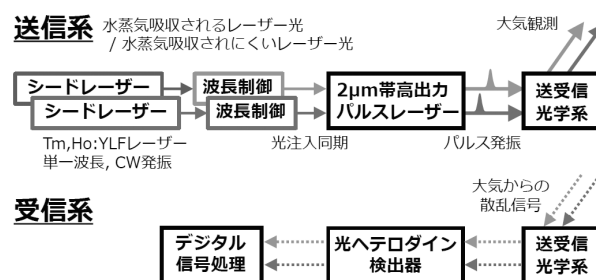


図2 MP-DIAL の構成

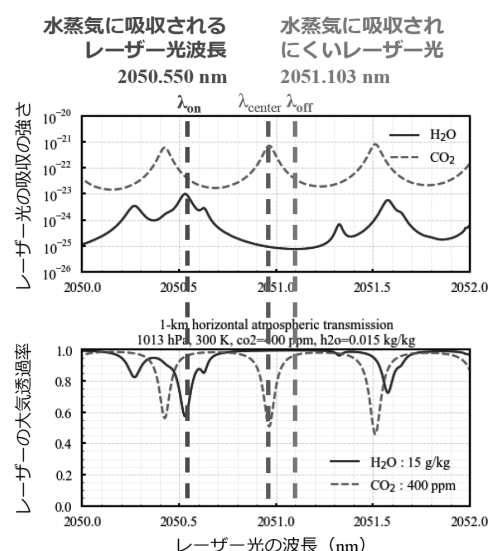


図3 2051nm 近傍における水蒸気および CO₂ の吸収特性。点線は CO₂ 濃度 400ppm の場合の吸収を、実線は水蒸気混合比 15g/kg の場合の吸収を示す。上図は気体の吸収断面積、下図は 1013hPa、300K における 1km 伝搬時の透過率を示している。

^{*4} パウンド・ドレーヴァー・ホール法と読む。高精度なレーザー光の波長制御法として知られている

MP-DIAL の計測性能検証

開発した MP-DIAL の性能を確認するため、東京都小金井市にある NICT 本部で、信頼性の高い気象観測装置であるラジオゾンデと同時観測を実施した。MP-DIAL は構内建物の屋上（地上高 20m）に設置し、鉛直方向にレーザー光を照射して観測した。MP-DIAL は距離分解能 95.9m、時間分解能 1 時間で散乱光を解析し、高度ごとの水蒸気量と計測誤差を算出した。一方、ラジオゾンデはゴム気球に搭載され、上空の気象データを無線で地上に送信する、気象庁の業務でも使用される高信頼性の観測装置である。放球は MP-DIAL から北北西約 300m の NICT 本部構内観測フィールドで行った [2]。

図 4 に示すように、MP-DIAL で観測された水蒸気量はラジオゾンデの結果と良く一致している。観測結果から、MP-DIAL は高度方向の水蒸気変動を的確に捉え、ラジオゾンデ^{*5}との比較では相関係数 0.81 という高い一致を示した。系統誤差は 1%、確率誤差は 10% であり、気象数値予報モデルへのデータ同化に必要な精度を十分に満たしていることが確認された。

ラジオゾンデの測定値 MP-DIAL の測定値

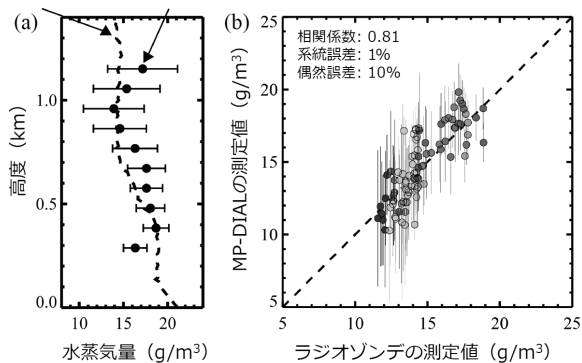


図 4

(a) ラジオゾンデと MP-DIAL で観測された水蒸気量の比較
(b) 16 個のラジオゾンデと MP-DIAL で観測された水蒸気量の比較

超伝導検出器を用いた新たな技術展開

計測性能検証では、MP-DIAL により風と水蒸気を同時に観測できることが確認された。しかし一方で、MP-DIAL が採用しているコヒーレント受信方式^{*6}では、ローカル光に起因するショットノイズが支配的

^{*5}ラジオゾンデは、ゴム気球に搭載され、上空の各種気象データを観測し、無線で地上に送信する装置で、気象庁の現業で用いられている高信頼性の高層気象観測装置である

^{*6}コヒーレントとは、波が互いに干渉しあう性質である。コヒーレント受信方式とは、送信した光の一部と大気で散乱して戻ってきた光とを干渉させて発生するうなり（ビート）から、散乱光の強さや周波数を取り出す方式を指す

あるため、送信出力を上げて、水蒸気の測定精度や観測距離、時間分解能を大幅に改善することは難しいことも明らかとなった。

この課題を克服する手法として、大気からの散乱光の光子数を単一光子検出器でフォトンカウンティングする直接検波受信方式の DIAL が提案されている。米国の宇宙機関である NASA の研究グループや、フランスの国立研究機関（CNRS）の研究グループも、この方式の研究をスタートしている。しかし、可視光や近赤外領域と比べると、波長 2μm 帯で使用可能な単一光子検出器は限られており、この波長帯での直接検波受信方式の DIAL 研究は依然少ないのが現状である。

近年、単一光子検出器の一種である超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SNSPD：Superconducting Nanowire Single-Photon Detector）が量子情報通信分野で広く使われるようになり、特に光通信帯（1.5μm）での単一光子センシングの研究が増加している。これにより、これまで困難だった地上での水平 200km を超える超長距離測距イメージングや、差分吸収ライダーによる温室効果ガス（CO₂）の面分布測定など、画期的な成果も報告されるようになった。SNSPD の長波長対応^{*7}に向けた研究も進展しており、NICT の超伝導 ICT 研究室では 2μm 帯で動作する SNSPD の開発に成功している [3]。

こうした背景から、NICT では、従来のコヒーレント受信方式の MP-DIAL に加え、波長 2μm 帯対応の SNSPD を用いた直接検波受信方式ライダーの検討を開始している。図 5 に示すのは、コヒーレント受信方式と直接検波受信方式のシミュレーションによる比較結果である。ここでは、測定時間分解能と水蒸気の測定誤差が 10% 以下となる観測距離を示している。鉛直観測では、直接検波受信方式はコヒーレント方式に比べて積算時間を最大で 600 分の 1 に短縮可能である。また、数分の積算時間で、コヒーレント方式では困難な長距離観測も実現可能である。さらに、日中でも長距離観測が可能であることは、可視光や近赤外光と比べて、太陽背景光の影響が小さい 2μm 帯の優位性を示している。

現在は、SNSPD の性能評価や DIAL システムへの実装に向けた準備を進めており、今後は SNSPD を組み込んだ MP-DIAL で水蒸気の計測実証を行う予定である。

^{*7}SNSPD は、光通信に使われる 1.5μm 帯のものが中心に開発されていたが、近年では応用範囲を広げるために、波長 2μm 帯を含むより長い波長に対応した素子の開発が始まっている

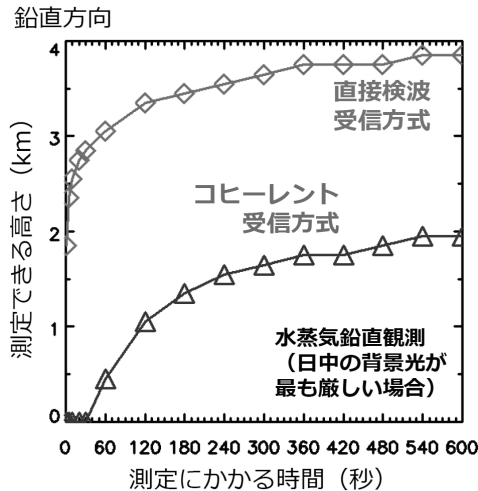


図5 水蒸気観測におけるコヒーレント受信方式と直接検波受信方式の比較結果。直接検波受信方式で信号対雑音比(S/N)が最も低下する日中において、水蒸気の測定誤差が10%以下となる最大観測距離を、各積分時間ごとにプロットした。

おわりに

本稿では、目に安全な波長 $2\mu\text{m}$ 帯の赤外線レーザー光を用い、大気中の水蒸気の流れを測定できるMP-DIALの原理、観測装置、実証結果、そして現在進行中の開発状況について紹介した。MP-DIALは、局地的な豪雨の予測精度を向上させる新しい観測手法として期待されており、現在は社会実装に向けて、各構成

要素の高性能化・安定化・低価格化を目指した技術開発が進められている。

今後は、風と水蒸気に加え、豪雨の発生に深く関わる気温も測定できる、より高性能なSNSPDを用いたMP-DIALの開発を計画している。気温計測には、送信光を3波長以上に拡張する多波長技術^{*8}が必要である。風、水蒸気、気温の空間分布と時間変動を同時に観測できるMP-DIALが実現すれば、積乱雲の発生メカニズムの理解が飛躍的に進み、豪雨予測の精度向上に大きく貢献すると考えられる。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費JP24H00275の助成を受けたものです。

^{*8}気体の吸収スペクトルの形状は気温と気圧に依存するため、3波長以上のレーザー光を用いてスペクトルの形状を把握できれば、気温と気圧の推定が可能になる

<参考文献>

- [1] M. Aoki and H. Iwai, "Dual-wavelength locking technique for coherent 2- μm differential absorption lidar applications," *Appl. Opt.* 60, 4259-4265 (2021).
- [2] H. Iwai and M. Aoki, "Evaluation of a coherent 2- μm differential absorption lidar for water vapor and radial wind velocity measurements," *Opt. Express* 31, 13817-13836 (2023).
- [3] F. China, M. Yabuno, S. Mima, S. Miyajima, H. Terai, and S. Miki, "Highly efficient NbTiN nanostrip single-photon detectors using dielectric multilayer cavities for a 2- μm wavelength band," *Opt. Express* 31, 20471-20479 (2023).



青木 誠

●略歴：2012年静岡大学大学院博士課程修了。静岡大学工学研究科研究員を経て、2014年NICTに入構。現在、電磁波研究所・電磁波伝搬研究センター・リモートセンシング研究室・主任研究員。博士（工学）。

●研究内容：MP-DIALの実用化に向けては、波長 $2\mu\text{m}$ 帯レーザーの高性能化に加え、安定性の向上と低価格化が不可欠である。現在は、観測の基準波長を生成する $2\mu\text{m}$ 帯シードレーザーの低価格化及び高性能化と、長距離観測に必要な大出力を得るために必要な $2\mu\text{m}$ 帯パルスレーザーの研究を進めている。

●研究者への道と今後の展望：子供のころから豆電球やLEDを光らせて遊ぶのが大好きで、大学では電気電子工学を専攻し、その延長線上で気づけばレーザーを光らせる研究者となった。現在は、そのレーザーを大気観測に応用するライダー技術の研究に取り組み、光によって風や水蒸気といった大気の情報高精度に計測することで、気象予測の高度化や災害の軽減に貢献することを目指している。今後は、ライダーに超伝導検出器や量子技術を融合させることで、従来の限界を超える観測精度と時間分解能を実現し、将来的には気象・気候の理解や防災システムの強化に資する新しいリモートセンシング技術の確立を目指していきたい。



大久保 洸祐

●略歴：2025年千葉大学大学院博士課程修了後、NICTに入構。現在、電磁波研究所・電磁波伝搬研究センター・リモートセンシング研究室・研究員。博士（工学）。

●研究内容：MP-DIALの研究開発に加えて、近距離における風のモニタリングを目的とした、高空間分解能ドップラーライダーの開発を進めている。市街地などの複雑な環境での風計測を可能にするため、アイセーフな波長である $2\mu\text{m}$ 帯を用いたレーザー技術の研究開発に取り組んでいる。

●研究者への道と今後の展望：宮城県の畜産農家に生まれ、幼少期は自然豊かな環境の中で育った。学生時代はサッカーやセパタクローなど運動に明け暮れていた。大学では、子供のころから身近に感じていた「風」という目に見えない存在に魅了され、レーザー光を用いて風を可視化する研究に取り組み、博士号を取得した。NICT入構後、レーザー光による風や水蒸気の計測技術の研究に加え、都市環境下での風計測の高度化を目指し、高空間分解能計測に関する研究にも取り組んだ。自然への関心と技術への探究心を原動力に、社会に貢献する研究を続けている。